

**Metodología para la caracterización geométrica de obras de
fábrica en cauces fluviales mediante técnicas fotogramétricas.
Aplicación a modelos hidráulicos.**

Máster Universitario en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y
Arquitectura. Universidad de Salamanca - Universidad de Valladolid

Septiembre de 2012

José María García Malmierca

RESUMEN

El siguiente proyecto trata de demostrar la posibilidad de convergencia y aplicación en modelos de cálculo hidráulico de dos técnicas que han tenido un gran desarrollo en los últimos años.

Por un lado, el desarrollo de técnicas fotogramétricas que de forma cada vez más sencilla y automatizada, permiten la extracción de información métrica de objetos a partir de varias tomas fotográficas.

Por otro lado, la mejora de los modelos digitales de elevación a partir de técnicas LIDAR y lo que es más importante aún, la facilidad de acceso a esta información dentro del Plan Nacional de Ortofotografía (PNOA).

En este contexto, es posible el desarrollo de metodologías, técnicas y procedimientos que de forma sencilla permitan la caracterización geométrica de las obras de fábrica y su incorporación a los cálculos de modelos hidráulicos.

La ejecución del modelo hidráulico con la incorporación de las obras de fábrica y sin estas, demostrará la importancia de no obviar la existencia de estas estructuras y las zonas de flujo no efectivo a las que se asocian en los cálculos de las láminas de inundación, tan en boga, a partir del desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI).

Como cuenca piloto se ha elegido las cuencas del Rivillas y Calamón, afluentes del Guadiana por su margen izquierda y que convergen a este en un mismo punto en la ciudad de Badajoz. En este punto se produjo en noviembre de 1997 un trágico episodio provocado por la crecida de ambos cauces que terminó con más de una veintena de muertos.

PALABRAS CLAVE

Fotogrametría, LIDAR, PNOA, SNCZI, Calibración de cámaras, Sistemas de Información Geográficos, SIG, HEC-RAS, HEC-GeoRAS, modelos hidráulicos, Modelos Digitales del Terreno, MDT, Modelos Digitales de Superficie, MDS, Modelos Digitales de Elevación, MDE, ArcGIS, PhotoScan, láminas, inundación

ABSTRACT

The next project is demonstrating the possibility of convergence and implementation on technical hydraulic calculation of two models that have had great development in recent years.

On the one hand, the development of photogrammetric techniques allowing the extraction of objects from several metric information in a simple and automated, photo shots.

On the other hand, the improvement of digital models of elevation from LIDAR techniques and more importantly still, ease of access to this information within the National Plan of orthophotography (PNOA).

In this context, the development of methodologies, techniques, and procedures enabling the geometric characterization of the culverts and their incorporation into the calculations of hydraulic models easily is possible.

The implementation of the hydraulic model with the addition of the culverts and without these, will demonstrate the importance of these structures and ineffective flow areas associated in the analysis of flood zones, so in vogue, from the development of the national system of mapping of flood zones (SNCZI).

As a pilot river basin has been chosen the basins of the Rivillas and Calamón, the Guadiana River left bank tributaries and that they converge to this at the same point in the city of Badajoz. At this point occurred in November 1997 a tragic episode caused by the flood of both channels that ended with more than twenty dead.

KEYWORDS

Photogrammetry, LIDAR, PNOA, SNCZI, calibration of cameras, systems of geographic information, GIS, HEC-RAS, HEC-GeoRAS, hydraulic models, digital terrain models, DTM, digital models of surface, MDS, digital elevation, MDE, ArcGIS, PhotoScan, sheets, flood models

AGRADECIMIENTOS

A Alicia, por el tiempo robado y tu comprensión.

A todos los que habéis tenido palabras de ánimo y alguna respuesta a mis preguntas.

Resumen	3
Palabras Clave	3
Abstract	4
Keywords	4
Agradecimientos	5
Introducción	10
Estado del arte	10
Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI)	11
LIDAR – PNOA	12
Modelización Hidraulica	14
Fotogrametría	14
Modelos Digitales del Terreno a partir de datos LIDAR	16
Contexto	18
Objetivos	20
Propuesta proyecto	20
Medios empleados	23
Instrumentación	23
Cámara fotográfica KODAK Z712IS	23
Cámara fotográfica CANON EOS 550D	26
Objetivo CANON EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS II	28
Distanciómetro láser LEICA DISTO A2	29
Teléfono Movil HTC WILDFIRE	29
Software	29
Sistemas de Información Geográficos	29
ArcGIS	29
Software Fotogramétrico	30
Agisoft PhotoScan	30
Agisoft Lens	30
Sv3DVision	30
PhotoModeler	31
Software de Navegación en campo	31
OruxMaps	31
Software Tratamiento LIDAR	31
Lastools	31
LP360 y LP Viewer	31
LIDAR Analyst	32
Fusion	32
LasEdit y Fugro Viewer	32
ArcGIS10	32
TerraScan, TerraSolid	33
Software Modelización Hidráulica	33

HEC-RAS	33
HEC-GEORAS	33
Hardware	34
Ordenador portátil ACER ASPIRE 5740G	34
Ordenador de Sobremesa	35
Medios Materiales	35
Metodología	36
Fase Previa. Análisis de alternativas	36
Levantamiento de obras de fábrica en cauces fluviales mediante técnicas fotogramétricas	36
Software fotogramétrico. Análisis de alternativas	36
Sv3Dvision	36
PhotoModeler	37
Software de modelizado a partir de una y múltiples imágenes en fase de desarrollo por parte del Grupo de Investigación Reconocido TIDOP del Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno	38
Agisoft PhotoScan	38
Cámaras Fotográficas. Análisis de alternativas	46
KODAK Z712is	46
CANON EOS 550D + Objetivo CANON 18-55is	46
Calibración de las cámaras. Alternativas	47
Calibración de la cámara fotográfica Kodak Z712IS	47
Calibración de cámara con Agisoft lens	47
Calibración de cámara con Photomodeler	53
Cámaras, calibración y software fotogramétrico. Conclusiones	58
Modelización hidráulica	59
Introducción a modelos hidráulicos unidimensionales	60
Análisis preliminar de la zona de estudio	60
Construcción de la geometría del modelo	61
Preparación de la geometría básica en HEC-GeoRAS	61
Importación de la geometría básica a HEC-RAS. Adición de elementos estructurales adicionales.	65
Caudales y condiciones de contorno	73
CAUMAX	75
Ejecución del modelo	76
Generación de productos SIG para la modelización hidráulica	77
Construcción de Modelos Digitales para cálculos hidráulicos aplicados a una cuenca.	78
Generación de modelos digitales del terreno	78
Modelo digital del terreno con datos PNOA (matching)	80
Mosaico de ortofotos PNOA	81
Análisis de los datos LIDAR de partida	83
Clasificación de los datos LIDAR	86
Generación del Modelo digital del terreno con datos LIDAR	90
Modelo de dirección de flujo y modelo de acumulación de flujo	94
Determinación de la Cuenca de los Ríos Rivillas y Calamón	98
Toma de datos de Campo	100
Trabajos de Gabinete. Procesado de datos	100
Caracterización Geométrica de puente y obras de fábrica	101

Obtención de la cota superior de la estructura _____	104
Diseño de fichas de caracterización de obras de fábrica _____	105
Conclusiones sobre Metodología _____	107
Fase Operativa. RIVILLAS _____	108
Modelos digitales e Información previa para modelización hidráulica _____	108
Elección de obras de fábrica objetivo _____	108
Toma de datos _____	109
Tratamiento y modelización de obras de fábrica _____	112
Inventario de las obras de fábrica _____	113
Modelización Hidráulica _____	113
Análisis preliminar de la zona de estudio _____	113
Preparación de la geometría básica en HEC-GeoRAS _____	123
Importación de la geometría básica a HEC-RAS adición de elementos estructurales adicionales. _____	124
Caudales y condiciones de contorno _____	127
Ejecución del Modelo _____	128
Resultados obtenidos _____	132
Resultados parciales _____	132
Cámaras, calibración y software fotogramétrico. Conclusiones _____	132
Modelización Hidráulica _____	133
Modelos Digitales _____	133
Toma de datos y trabajo de gabinete _____	133
Resultados finales _____	133
Análisis de los Resultados _____	134
Conclusiones _____	138
Líneas abiertas / Desarrollos futuros _____	140
Bibliografía _____	142
Bibliografía _____	142
referencias web _____	143
Anexo. Localización e inventario de las obras de fábrica _____	144

INTRODUCCIÓN

El especialista en *geomática*, definiendo esta como; el conjunto de ciencias en las cuales se integran los medios para la captura, tratamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de información geográfica, tiene cada vez más a su disposición un gran conjunto de técnicas y tecnologías candidatas a dar soluciones a problemas del mundo real.

Por otro lado, en los últimos años asistimos al paradigma de la *interoperabilidad*, entendida esta como la necesidad de comunicación entre sistemas de forma que puedan dar respuesta a objetivos comunes. La interoperabilidad necesita de estándares que permitan esta comunicación.

Aplicando ambos conceptos podemos buscar la convergencia entre técnicas y tecnologías independientes hasta el momento, pero que pueden ser complementarias en aras de objetivos comunes.

En los últimos años el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, siguiendo los principios de la Directiva 2007/60 sobre evaluación y gestión de riesgos de inundación, transpuesta a la legislación española mediante el Real Decreto 903/2010 de evaluación y gestión de riesgos de inundación, ha puesto en marcha el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), un instrumento de apoyo a la gestión del espacio fluvial, la prevención de riesgos, la planificación territorial y la transparencia administrativa.

Entre otras medidas la aprobación de estas normas trata de definir a lo largo de diferentes fases las llamadas Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs) tras la evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRIs) cuyas últimas actuaciones se están terminando.

Gran parte de las actuaciones llevadas a cabo para las EPRIs ha sido la modelización hidráulica para la delimitación de zonas de riesgo de inundación. Aprobada esta fase, serán necesarios estudios de detalles donde podrían ser de aplicación algunas de las consideraciones desarrolladas en el presente proyecto.

El presente trabajo se vale de diferentes técnicas geomáticas para la mejora de los procesos de modelización hidráulica.

Las tecnologías utilizadas en el presente trabajo podemos resumirlas en:

- Fotogrametría terrestre.
- Sistemas de Información Geográfico.
- Modelización Hidráulica.
- LIDAR.

ESTADO DEL ARTE

En el presente trabajo se distingue una fase de análisis de alternativas y otra fase operativa donde se desarrolla el método a partir de las conclusiones extraídas de la fase de análisis. En la fase de análisis se presentan varias alternativas que conforman el estado del arte concreto para las diferentes técnicas y tecnologías que se abordan en el presente trabajo. No obstante y a modo introductorio se detalla a continuación la situación de las tecnologías y planes importantes en el desarrollo del presente trabajo.

SISTEMA NACIONAL DE CARTOGRAFÍA DE ZONAS INUNDABLES (SNCZI)

El Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, consciente de la importancia que tienen la determinación de las zonas inundables para la correcta prevención de los daños por inundaciones y para la preservación del estado ecológico de nuestros ríos ha decidido impulsar la delimitación general de las áreas inundables en aquellos tramos sin estudios actuales.

Esta delimitación abarca los siguientes aspectos:

- **Dominio público hidráulico:**

Se delimitará dentro del dominio público hidráulico probable aquellas áreas que se encuentren cubiertas por las aguas en las máximas crecidas ordinarias, lo que será puesto de manifiesto a partir de las evidencias geomorfológicas de la dinámica fluvial. En general, la delimitación de este elemento se realizará siguiendo criterios geomorfológicos, apoyándose en la información de inundaciones ocurridas en el pasado y estudiando fotografías aéreas históricas y actuales. Se valorará la posibilidad de incluir las zonas relacionadas con las previsibles migraciones del cauce en un futuro cercano, hecho que dependerá de las circunstancias de la zona (migración de meandros y avulsiones recientes, orillas erosivas móviles, etc.). Complementariamente, se desarrollará un modelo hidráulico, en condiciones naturales, sin tener en cuenta el efecto de las infraestructuras de laminación de caudales ubicadas aguas arriba, ni el de las modificaciones antrópicas de cualquier tipo del cauce, asociadas o no con la defensa frente a inundaciones y que será coherente y siempre calibrado con la información histórica y geomorfológica disponible en el tramo de río analizado y con los tramos aguas arriba y abajo. Se cuantificará el caudal de desbordamiento, que será comparado con los estudios existentes sobre la máxima crecida ordinaria. Del mismo modo, se incluirá una comparación de la cartografía generada con la base de datos del catastro, al objeto de identificar posibles discrepancias.

- **Zona de flujo preferente:**

Esta zona se delimitará con el objeto de preservar la estructura y funcionamiento del sistema fluvial, dotando al cauce del espacio adicional suficiente para permitir su movilidad natural así como la laminación de caudales y carga sólida transportada, favoreciendo la amortiguación de las avenidas. De acuerdo a su definición, se trata de una zona en la que, con periodos de recurrencia frecuentes, la avenida genera formas erosivas y sedimentarias debido a su gran energía. La zona de flujo preferente incluirá la vía de intenso desagüe, así como las zonas de elevada peligrosidad para la avenida de 100 años de periodo de retorno. Esta zona se delimitará mediante el desarrollo de un modelo hidráulico que será coherente con la información histórica y geomorfológica del tramo de río analizado y de los situados aguas arriba y abajo.

- **Zonificación del área inundable:**

El área inundable englobará las zonas cubiertas por las aguas de avenidas excepcionales (con una recurrencia de 500 años aproximadamente). Esta área se zonificará según el periodo de recurrencia de las inundaciones sea: frecuente (la que corresponde a la avenida de 50 años), media u ocasional (la que corresponde a la avenida de 100 años) y excepcional (la que corresponda a la avenida de 500 años), cumpliendo así las indicaciones de la Directiva de Inundaciones y facilitando la integración de la cartografía desarrollada por las Comunidades Autónomas y Protección Civil dentro del marco de la Directriz Básica de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones. Se integrarán estas líneas cuando una Comunidad Autónoma las tenga ya elaboradas y presenten un grado de precisión suficiente. La zonificación será realizada en base a la información de las inundaciones ocurridas en el pasado y a las evidencias geomorfológicas. Complementariamente se desarrollarán modelos hidráulicos, que serán coherentes con la información histórica y geomorfológica disponible en el tramo de río

analizado, así como con los tramos ubicados aguas abajo y arriba. Estos modelos permitirán estimar la velocidad y calado en estas zonas. La zonificación de la peligrosidad deberá incorporar, de forma consistente, la información aportada por ambos métodos. Se identificarán aquellas estructuras antrópicas del tramo de estudio (encauzamientos, carreteras, rellenos, escombreras, etc.) que puedan generar modificaciones de la zona inundable. Se identificarán las zonas inundables que actualmente se encuentren desligadas de la dinámica fluvial como consecuencia de dichas estructuras y aquellas otras no inundables en régimen natural, pero que sí lo son como consecuencia de la estructura. En la medida de lo posible, se deberá tener en cuenta la carga sólida, utilizando mapas geomorfológicos y modelos de pérdidas de suelo para eventos singulares.

- **Zonas susceptibles de sufrir avenidas rápidas de alta densidad y flujos de derrubios:** Se identificarán y cartografiarán estas zonas en base a criterios geomorfológicos, zonificando su peligrosidad en la medida de lo posible.
- **Zonas de policía y servidumbre:** Estas zonas se delimitarán de acuerdo con los estudios y a la legalidad vigente.

LIDAR – PNOA

Presentación y Objetivos

El Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) tiene como objetivo la obtención de ortofotografías aéreas digitales con resolución de 25 ó 50 cm y modelos digitales de elevaciones (MDE) de alta precisión de todo el territorio español, con un período de actualización de 2 ó 3 años, según las zonas. Se trata de un proyecto cooperativo y cofinanciado entre la Administración General del Estado y las Comunidades Autónomas.

Se realiza un vuelo fotogramétrico único y un tratamiento riguroso de los datos cumpliendo con unas especificaciones técnicas consensuadas entre todas las Administraciones Públicas participantes. Este planteamiento de producción descentralizada y cooperativa entre las distintas administraciones es acorde con el espíritu de la Directiva Europea INSPIRE para el establecimiento de una Infraestructura de datos geográficos en Europa, que persigue que el nivel de detalle máximo de la información geográfica se capture una sola vez y que se comparta abiertamente entre los distintos agentes sociales que tengan necesidad de la misma. Tanto los recubrimientos de ortoimágenes como los Modelos Digitales de Elevaciones forman parte de los "datos básicos de referencia" recogidos en dicha Directiva COM/2004/516/0175/(COD).

La fotografía aérea es la base para la realización de cartografía y la información geográfica en general, ocupación del suelo, urbanismo y ordenación del territorio, catastro, gestión forestal, hidrografía, etc. Utilizando los mismos datos fotogramétricos de partida, se consigue además una perfecta coherencia geométrica y temporal de las bases de datos cartográficos y geográficos existentes en todas las administraciones. Las características de los productos obtenidos en el PNOA, satisfacen las necesidades de todas las administraciones implicadas.

Organización

La dirección del proyecto es asumida por el Ministerio de Fomento, a través de la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Centro Nacional de Información Geográfica



(CNIG) y se coordina con los demás Ministerios interesados y con cada Comunidad Autónoma, que a su vez coordina a las Consejerías competentes (Obras públicas, Agricultura, Medio Ambiente,...).

La producción se realiza de manera descentralizada por cada equipo autonómico, siendo el Instituto Geográfico Nacional el responsable de la validación final, y la integración de los productos resultantes.

Productos

Imágenes aéreas. Fotogramas digitales de los vuelos PNOA (a partir del año 2004), con tamaño de píxel 0.22 m ó 0.45 m, de 8 bits en formato TIFF, con los correspondientes ficheros de georreferenciación en formato TFW y en formato ECW georreferenciado. Sistema de referencia geodésico ETRS89 en Península e Illes Balears y REGCAN95 en Canarias. Proyección UTM en el huso correspondiente. Ficheros con cuatro bandas RGB y NIR (rojo, verde, azul e infrarrojo cercano), o un fichero RGB y el correspondiente NIR.

Fotogramas históricos. Fotogramas realizados por el IGN u otros organismos de la Administración General del Estado, previos al año 2004. Algunos de estos de vuelos, que tienen una cobertura nacional, se encuentran escaneados.

Ortofotos digitales de los vuelos PNOA (a partir del año 2004), con tamaño de píxel 0.25 m ó 0.50 m, en formato TIFF con el correspondiente fichero TFW de georreferenciación. Sistema de referencia geodésico será ETRS89 en Península e Illes Balears y REGCAN95 en Canarias. Proyección UTM en el huso correspondiente, siendo el corte de hojas 1/5.000 ó 1/10.000 según cuadrícula oficial.

Mosaicos PNOA de máxima resolución o máxima actualidad (a partir del año 2004). A partir de las ortofotografías aéreas del proyecto PNOA, se han generado mosaicos por hojas a 1/50.000, de máxima resolución y máxima actualidad en formato ECW.

Modelos digitales del terreno y datos LIDAR

MDT05. Modelo digital del terreno con paso de malla de 5 m, con la misma distribución de hojas que el MTN25. Formato de archivo ASCII matriz ESRI. Sistema geodésico de referencia ETR89 (en Canarias REGCAN95, compatible con ETRS89), proyección UTM en el huso correspondiente a cada hoja, y también en huso 30 extendido, para las hojas que se encuentran en dos husos. En Canarias en huso 28. El MDT es obtenido mediante correlación automática y posterior edición, a partir de los vuelos fotogramétricos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), con tamaño de píxel de 25 o 50 cm y a partir de vuelos LIDAR donde existan.

MDT25. Modelo digital del terreno con paso de malla de 25 m, con la misma distribución de hojas que el MTN25. Formato de archivo ASCII matriz ESRI (agr). Sistema geodésico de referencia ETRS89 (en Canarias REGCAN95, compatible con ETRS89) y proyección UTM en el huso correspondiente a cada hoja y también en el huso 30 extendido (para hojas situadas en los husos 29 y 31). En Canarias el huso es el 28. El MDT25 se ha obtenido por interpolación de modelos digitales del terreno de 5 m de paso de malla procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).

MDT200. Modelo digital del terreno con paso de malla de 200 m, con distribución por provincias (rectángulo envolvente de cada provincia). Formato de archivo ASCII matriz ESRI (agr). Sistema geodésico de referencia ETRS89 (en Canarias REGCAN95, compatible con ETRS89) y proyección UTM en el huso correspondiente a cada provincia y también en el huso 30 extendido (para provincias en los husos 29 y 31). Canarias está proyectadas en huso 28. El MDT200 se ha obtenido por interpolación de modelos digitales del terreno de 5 m de paso de malla procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).

Datos LIDAR. Modelo digital de superficies obtenido mediante sensores LIDAR, con una densidad media de 0.5 ptos/m², con una distribución de hojas de 2x2 km. Formato de archivos LAS, con alturas elipsoidales. Los datos están sin clasificar. Sistema geodésico de referencia ETRS89 (en Canarias REGCAN95, compatible con ETRS89) y proyección UTM en el huso correspondiente a cada hoja.

MODELIZACIÓN HIDRAULICA

La modelación de la propagación de avenidas en ríos requiere resolver las ecuaciones del flujo variable del agua en lámina libre o ecuaciones de Saint Venant. Estas ecuaciones se deducen a partir de las leyes físicas de conservación que rigen el flujo de un fluido en general. Para un fluido incompresible e isótropo, como el agua, se obtienen las ecuaciones de Navier Stokes para el movimiento instantáneo, y de ellas se deducen, considerando variables medias en el tiempo, las ecuaciones de Reynolds. Su resolución exigiría una discretización tridimensional del dominio de estudio y el esquema numérico sería complejo, pero sobre todo muy costoso computacionalmente.

Las características del flujo de agua en cauces naturales permiten simplificar estas ecuaciones generales, de modo que de las ecuaciones de Reynolds, integrando en la profundidad y por lo tanto eliminando la dimensión vertical, se obtienen las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones, validas cuando el flujo que se quiere analizar presenta carácter bidimensional, con velocidades verticales pequeñas, pendientes del fondo del cauce suaves y en general predominio de las dimensiones horizontales sobre la vertical. Cuando el movimiento del flujo en cauces naturales o artificiales presenta un marcado carácter unidimensional, se pueden obtener las ecuaciones de Saint Venant en una dimensión. Dichas ecuaciones representan correctamente el movimiento no permanente en lámina libre en este tipo de cauces.

Para el análisis de las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones, se han desarrollado los esquemas bidimensionales. En estos se hacen diferentes aproximaciones de acuerdo al tipo de problema a estudiar, es decir de acuerdo al tipo de fuerzas determinantes del movimiento del agua y a las variables que interese conocer.

Las posibilidades de descripción del territorio que ofrecen los Sistemas de Información Geográficos junto con los nuevos métodos de captura hacen posible alimentar los modelos bidimensionales y resolverlos de forma menos compleja para el usuario, labor casi imposible hasta la aparición de modelos digitales de elevación y superficie.

En el apartado de análisis hidráulico se profundiza en el análisis unidimensional.

FOTOGRAMETRÍA

El fin último de la fotogrametría es la reconstrucción de objetos en modelos tridimensionales. La fotogrametría ha tenido una continua evolución desde sus inicios, teniendo su principal desarrollo en la fotogrametría aérea frente a la terrestre. Sin embargo, es en los últimos años, donde se ha producido un gran avance en la fotogrametría de objetos cercanos, beneficiándose de algoritmos y técnicas de uso en la fotogrametría aérea.

Obviaremos otros métodos de captura directa o indirecta que no tengan como origen la toma de datos a partir de la imagen fotográfica.

La fotogrametría, como parte de la interpretación de imágenes, es una disciplina que permite formular modelos 3D a partir de fotografías 2D; es una técnica de medición indirecta ya que las mediciones no se efectúan sobre el objeto, sino sobre imágenes del mismo. La fotogrametría se apoya fundamentalmente en las relaciones matemáticas de la geometría proyectiva y de la visión estereoscópica que posee

naturalmente el ser humano. Desde sus inicios hasta la actualidad la fotogrametría ha ido de la mano de la tecnología, dando pasos desde la fotogrametría analógica, pasando por la fotogrametría analítica, llegando hoy a la fotogrametría digital.

La fotogrametría puede definirse como el arte, ciencia y tecnología cuyo fin es el de obtener información cuantitativa fiable relativa a objetos físicos y su entorno, mediante procesos de registro, medida e interpretación de imágenes fotográficas (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing- 1979).

La fotogrametría se desarrolla y evoluciona en cuatro etapas:

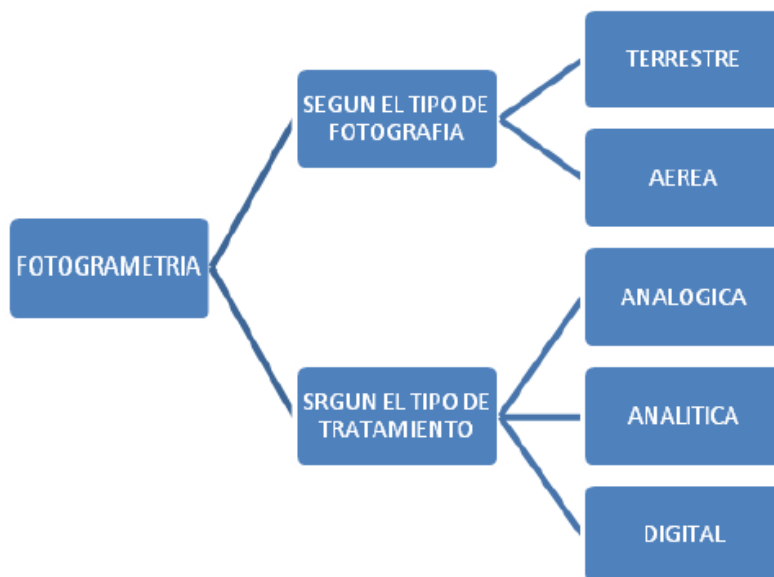
Metrofotografía: de partir de 1850 hasta 1900. Se inicia con la invención de la fotografía por Niepce y Daguerre en 1839 en Francia. El término Metrofotografía fue ideado por el coronel francés Laussedat hacia 1851; a quien se lo considera el fundador de la Fotogrametría.

Fotogrametría analógica: desde 1900 a 1960, ciclo que se inicia con dos grandes avances, por un lado la estereoscopia dando origen a la estereofotogrametría y por otro lado el invento de plataformas adecuadas para los sensores (cámaras) como los zeppelines y el aeroplano.

Fotogrametría analítica: desde 1969 hasta 1980, ciclo iniciado por la aparición de las computadoras.

Fotogrametría digital: desde 1980 hasta nuestros días.

La fotogrametría suele clasificarse en función de la plataforma de toma o según el tratamiento.



Fotogrametría Terrestre: tiene su principal aplicación en la arquitectura y la arqueología y se basa en el principio de la toma de fotografías desde la tierra, como la hacemos habitualmente; donde la posición de la cámara y el objeto es perfectamente conocida.

Fotogrametría Aérea: es la que utiliza fotografías aéreas tomadas desde una cámara de toma de vistas, ubicada en una plataforma especial (avión).

Fotogrametría analógica: se basa en la utilización de aparatos de restitución ópticos o mecánicos, donde el operador realiza la alineación de las imágenes para crear un modelo estereoscópico debidamente nivelado y escalado.

Fotogrametría analítica: con la utilización de los restituidores analógicos y la incorporación de las computadoras se da inicio a la fotogrametría analítica.

Fotogrametría digital: finalmente el avance tecnológico hizo posible llegar a la fotogrametría digital. El uso de las computadoras y los programas ó software aplicados dan origen a los modelos digitales del terreno 3D, etc.

La aparición de la fotogrametría digital ha permitido la restitución fotogramétrica fuera del caso normal estereoscópico a partir de algoritmos que permitan resolver las condiciones de colinealidad y coplanaridad que se dan en la toma fotográfica, siendo una especialidad de esta última que podremos denominar como fotogrametría convergente. Lo habitual es que para la restitución de puntos sea necesario que el operador identifique puntos homólogos en varias tomas, si bien, son y están siendo aplicables técnicas de correlación de imágenes que permiten la identificación de los puntos en diferentes tomas de forma automática.

La aplicación de estas técnicas hacen pensar en soluciones de resolución de modelos 3D prácticamente instantáneos, pues a partir de los algoritmos y con un tratamiento mínimo, es posible, resolver las fases del proceso fotogramétrico de forma automática.

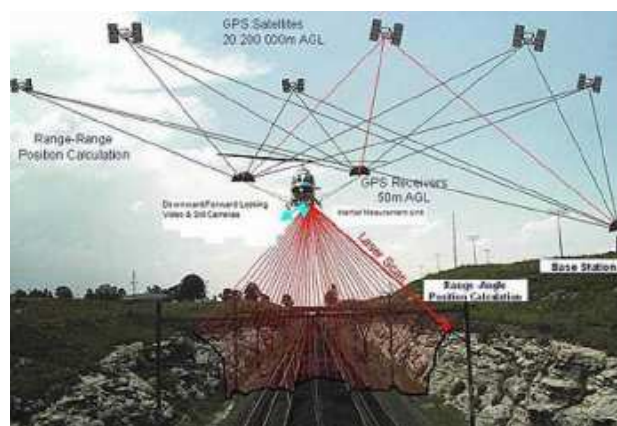
La solución de software propuesta para la realización de los trabajos descritos con posterioridad, PhotoScan, alcanza grandes niveles de automatización.

MODELOS DIGITALES DEL TERRENO A PARTIR DE DATOS LIDAR

LIDAR significa Light Detection And Ranging, literalmente alcance y detección de la luz.

Se trata de un sensor activo, ya que él mismo genera la energía (el pulso láser) que permite hacer los cálculos y las medidas. Esto permite usar el sensor de noche para evitar el tráfico aéreo. Sin embargo, a diferencia del RADAR, el sensor LIDAR no atraviesa nubes, lluvia o niebla. Esto permite su uso en aplicaciones de datos LiDAR para estudios atmosféricos y climatológicos. Del mismo modo es posible usar el sensor LiDAR para captura de datos batimétricos, aunque es necesario un pulso láser diferente (la banda verde con el infrarrojo).

El sensor LiDAR utiliza el mismo principio que el RADAR, solo que en lugar de usar ondas de radio utiliza pulsos de luz. El láser LiDAR envía una señal a la superficie terrestre desde un sensor aerotransportado; algunas de estas señales regresan de vuelta al transporte aéreo; el tiempo que tarda el rayo láser en llegar hasta la superficie terrestre y regresar al transporte aéreo se emplea para determinar la distancia hasta los elementos de la superficie. También es posible determinar el ángulo de salida del



láser y la localización y la altura del transporte aéreo. De este modo es posible calcular de forma muy precisa la altura de los árboles, los edificios y cualquier elemento sobre el terreno.

Sus ventajas frente a otros procesos de captura de datos de elevación son: la precisión de centímetros, la mayor resolución y la obtención de datos con estas características bajo la cubierta vegetal.

La precisión de los datos se debe a la capacidad del sensor para emitir pulsos de luz. El resultado es una densa red de puntos de elevación georreferenciados de elevada precisión, denominada “nube de puntos”. Esta nube de puntos se puede usar para generar modelos tridimensionales de la superficie terrestre y sus objetos.



La habilidad del sensor LiDAR para capturar información bajo la cubierta vegetal, es una de sus principales ventajas, ya que el resto de sensores utilizados en teledetección son incapaces de resolver este problema.

Gracias a la elevada densidad de la nube de puntos generada por el sensor, incluso si un pequeño porcentaje de puntos alcanza el suelo, es suficiente para crear un Modelo Digital del Terreno con bastante precisión. En casos concretos, como la selva tropical, es posible crear Modelos Digitales del Terreno más precisos que las ortofotos o las ortoimágenes.

Los Modelos Digitales del Terreno (MDT) son, a grandes rasgos, representaciones simplificadas de la topografía del terreno. Las elevaciones forman una superficie tridimensional ondulada, en la que dos dimensiones se refieren a los ejes de un espacio octogonal plano (X, Y), y la tercera mide la altura (Z).

El uso de los sistemas LIDAR se debe principalmente al incremento de la disponibilidad de datos, debido a su vez a la reducción del precio de los sensores aerotransportados. Esto, combinado con la disposición cada vez mayor de información GPS, permite la captura de una elevada densidad de datos de alta precisión. Esta precisión oscila entre 1 y 3 centímetros.

El proceso de adquisición de datos LiDAR es similar al usado en fotografía aérea. Es necesario realizar un estudio de planeamiento previo antes de iniciar el proceso de obtención de datos. Al igual que en la fotografía aérea, una comprensión detallada de las necesidades, los usos y las aplicaciones de los datos permite establecer los parámetros del vuelo.

Pre-procesado, filtrado y clasificación de los datos brutos

El proceso de captura consiste básicamente en la sincronización (en formato binario) de los datos con la información de navegación (x, y, z). Por esta razón es necesario procesar los datos que permitan generar productos de gran precisión.

El proceso de trabajo es el siguiente:

- Procesamiento de los datos GPS/INS, asegurando la cobertura completa, sin huecos, y la calidad de los datos.
- Eliminación de solapes: para evitar la duplicación de información y conseguir una densidad de puntos por metro cuadrado más homogénea.
- Depuración de la nube de puntos, clasificación y filtrado de las respuestas láser. En este punto se extrae la vegetación y todos los objetos sobre la superficie. Una vez extraídos, se calcula la altura de los puntos que quedan en esas zonas vacías mediante interpolación.

Generación de modelos digitales

Una vez que se ha obtenido una nube de puntos clasificada, se pueden generar productos derivados tales como los MDE. Se puede mejorar la precisión de estos modelos incluyendo líneas de ruptura, al igual que en los procesos de fotogrametría.

CONTEXTO

Dentro del contexto académico, este trabajo se desarrolla dentro del máster impartido por la Universidades de Valladolid y Salamanca presente proyecto se enmarca dentro de la titulación del máster de postgrado oficial en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura

El presente proyecto se enmarca dentro de la asignatura de Proyecto Fin de Máster con perfil de investigación (12 ECTS) y tiene como objetivo desarrollar dentro de un perfil de investigación los conocimientos adquiridos durante el máster.

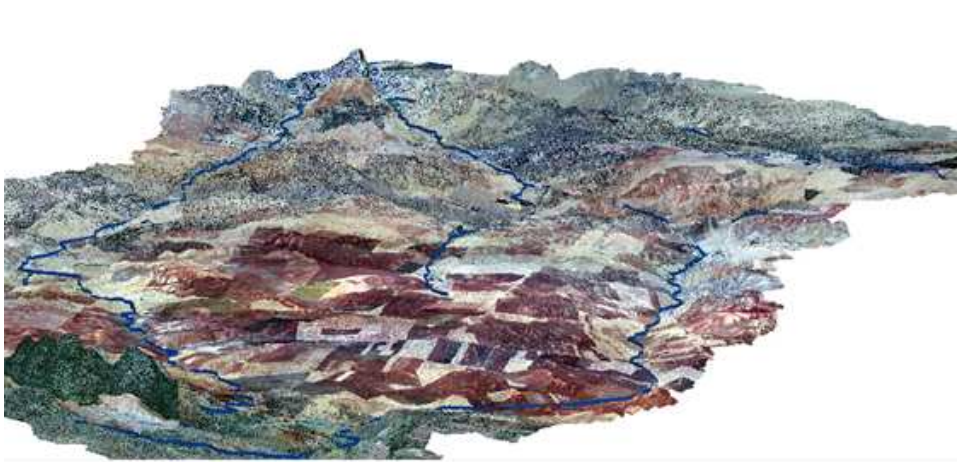
Por otro lado, el desarrollo de los trabajos se enmarca dentro de un contexto geográfico definido por las cuencas hidrográficas de los ríos Rivillas y Calamón. Ambos confluyen en la ciudad de Badajoz, siendo tributarios del Guadiana por su margen izquierda.



La oportunidad de realizar el siguiente trabajo surge de los trabajos que están siendo realizados para los análisis preliminares de riesgo de inundación descritos anteriormente y la necesidad de definir un método que permita el levantamiento de las obras de fábrica que permitan incorporar estas en la modelización hidráulica de forma sencilla.

La zona escogida se debe a los trágicos acontecimientos que tuvieron lugar en la zona en noviembre de 1997 en el que más de 20 personas murieron debido a la crecida de ambos ríos. Tiene una extensión de 32.000 has. y las cotas oscilan entre los 150 y 450 metros sobre el nivel del mar. Presenta pendientes suaves dominando en todo momento las vegas aluviales de ambos cauces los cuales se encuentran muy alterados por la acción del hombre. El paisaje se encuentra compuesto por dehesas y tierras de labor siendo el cereal el principal cultivo. En las márgenes de ambos ríos han ido creciendo urbanizaciones de origen ilegal que condicionan el normal desarrollo de los cauces.





OBJETIVOS

Con la realización de este proyecto se marcan una serie de objetivos, algunos de ellos, personales, como son:

- Familiarización con datos LIDAR y generación de productos
- Introducción a la modelización Hidráulica
- Aplicación de nuevos desarrollos fotogramétricos a otras disciplinas.

PROPUESTA PROYECTO

Siguiendo las instrucciones dadas por la dirección del máster, se entrega con fecha anterior al 10 de febrero la siguiente propuesta de proyecto fin de máster:

Título del Proyecto

Metodología para la caracterización geométrica de obras de fábrica en cauces fluviales mediante técnicas fotogramétricas. Aplicación a modelos hidráulicos.

Tipo.

Investigador 12 ECTS

Contexto del Proyecto/Entorno de trabajo

El siguiente proyecto trata de reafirmar la posibilidad de convergencia y aplicación directa a modelos susceptibles de ser utilizados en cálculos hidráulicos, de dos técnicas que han tenido un gran desarrollo en los últimos años.

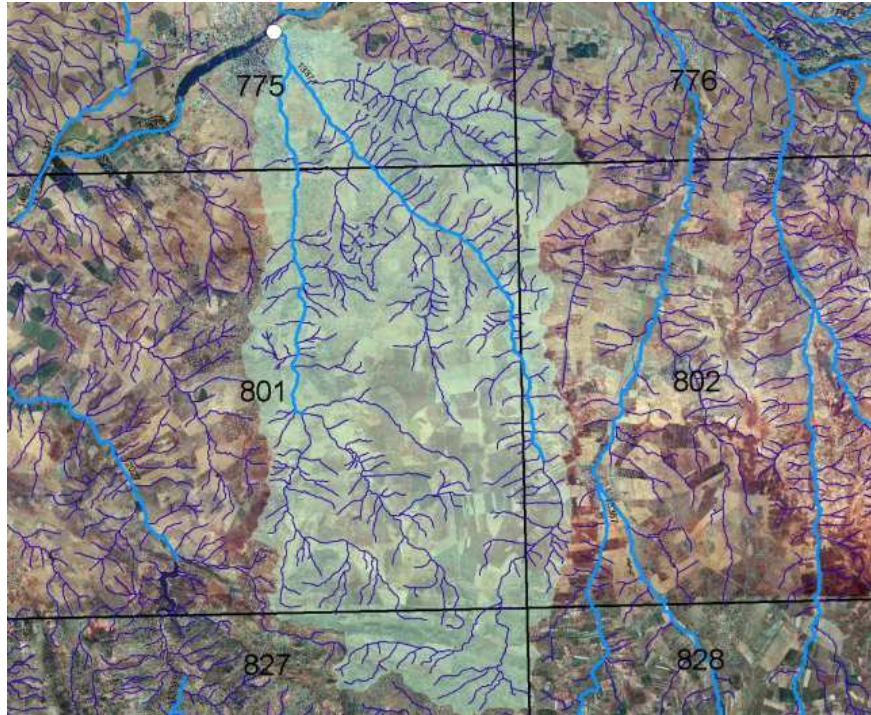
Por un lado, las últimas técnicas fotogramétricas desarrolladas, que de forma cada vez más sencilla y automatizada, permiten la extracción de información métrica de objetos a partir de una o varias tomas.

Por otro lado, la mejora de los modelos digitales de elevación a partir de técnicas LIDAR y lo que es más importante aún, la facilidad de acceso a esta información dentro del Plan Nacional de Ortofotografía (PNOA)

En este contexto es posible el desarrollo de metodologías, técnicas y procesos que puedan valerse y comprobar la validez de desarrollos experimentales en el campo de la fotogrametría y que permitan la mejora de modelos del terreno aplicados en el campo de la hidráulica.

Como caso práctico de aplicación se propone la comparación de resultados a partir del modelo generado en una cuenca experimental y la comparación de resultados con trabajos realizados anteriormente por la administración pública.

Como cuenca piloto se ha elegido las cuencas del Rivillas y Calamón, afluentes del Guadiana por su margen izquierda y que convergen a este en un mismo punto en la ciudad de Badajoz. En este punto se produjo en noviembre de 1997 un trágico episodio provocado por la crecida de ambos cauces que terminó con más de una decena de muertos.



Dada la extensión de la cuenca en conjunto, unas 32.000 has. se priorizarán las estructuras a aquellas más próximas a las confluencias de los arroyos Rivillas y Calamón y la zona urbana circundante a la ciudad de Badajoz

Objetivos del Proyecto

- Desarrollo de una metodología para la caracterización geométrica de obras de fábrica en cauces fluviales mediante técnicas fotogramétricas.
- Construcción de Modelos Digitales mejorados para cálculos hidráulicos aplicados a una cuenca.

Metodología a emplear

Desarrollo de una metodología para el levantamiento de obras de fábrica en cauces fluviales mediante técnicas fotogramétricas.

A partir de software de modelizado a partir de una y múltiples imágenes que se están llevando a cabo por parte del Grupo de Investigación Reconocido TIDOP del Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno se llevarán cabo los trabajos de acuerdo a los objetivos. En principio se vislumbran las siguientes fases:

- Toma de datos de las obras de fábrica.
 - Identificación de objetivos
 - Diseño de campaña de toma de datos.
 - Toma de datos experimental.
 - Toma de datos final.
- Trabajos de gabinete
 - Análisis de posibles metodologías de extracción
 - Análisis de automatización del proceso.
 - Extracción de geometrías útiles
 - Inventariado de obras de fábrica.

Construcción de Modelos Digitales mejorados para cálculos hidráulicos aplicados a una cuenca.

A partir de los datos LIDAR, que serán solicitados al IGN, y la información obtenida de los trabajos anteriores se tratará de obtener modelos mejorados para el desarrollo de aplicaciones y cálculos hidráulicos. Se utilizará el modelo generado para la obtención de parámetros hidráulicos y la comparación con otros estudios realizados anteriormente.

Productos a generar

- Inventario de obras de fábrica caracterizadas geométricamente en las cuencas descritas.
- Modelos digitales del terreno con las obras de fábrica incorporadas.
- Análisis hidráulico de la cuenca piloto.
- Análisis y conclusiones sobre la metodología empleada.

Esta es admitida, según publicación del 16 de marzo, siendo asignados como tutores:

- Don Diego González Aguilera
- Don Fernando Espejo Almodóvar

Son, por tanto, **OBJETIVOS** de este proyecto:

Desarrollo de una metodología para el levantamiento de obras de fábrica en cauces fluviales mediante técnicas fotogramétricas.

A partir de software de modelizado a partir de una y múltiples imágenes que se están llevando a cabo por parte del Grupo de Investigación Reconocido TIDOP del Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno se llevarán cabo los trabajos de acuerdo a los objetivos. En principio se vislumbran las siguientes fases:

- Toma de datos de las obras de fábrica.
 - Identificación de objetivos
 - Diseño de campaña de toma de datos.
 - Toma de datos experimental.
 - Toma de datos final.
- Trabajos de gabinete
 - Análisis de posibles metodologías de extracción
 - Análisis de automatización del proceso.
 - Extracción de geometrías útiles
 - Inventariado de obras de fábrica.

Construcción de Modelos Digitales mejorados para cálculos hidráulicos aplicados a una cuenca.

A partir de los datos LIDAR, que serán solicitados al IGN, y la información obtenida de los trabajos anteriores se tratará de obtener modelos mejorados para el desarrollo de aplicaciones y cálculos hidráulicos. Se utilizará el modelo generado para la obtención de parámetros hidráulicos y la comparación con otros estudios realizados anteriormente.

Productos a generar

- Inventario de obras de fábrica caracterizadas geométricamente en las cuencas descritas.
- Modelos digitales del terreno con las obras de fábrica incorporadas.
- Análisis hidráulico de la cuenca piloto.
- Análisis y conclusiones sobre la metodología empleada.

MEDIOS EMPLEADOS

En los siguientes apartados se describen los medios utilizados en el desarrollo del presente proyecto, tanto instrumentales como de software y hardware.

INSTRUMENTACIÓN

CÁMARA FOTOGRÁFICA KODAK Z712IS

La cámara que se pretende calibrar es una **Kodak Z712IS**. Se trata de una cámara que podemos encuadrarla dentro de un segmento medio-bajo. Es ideal para aquellos usuarios que quieran iniciarse en el mundo de la fotografía manejando los diferentes controles manuales sin pagar un alto precio. Tiene un buen zoom 12X estabilizado.



Sus características técnicas son las siguientes:

Características estándar	
Tipo de sensor	CCD de 1 / 2,5 pulg.
Píxeles en total de CCD	7,4 MP (3.152 × 2.342)
Píxeles reales	7,1 MP (3.081 × 2.313)
Objetivo	objetivo SCHNEIDER-KREUZNACH VARIOGON 36 – 432 mm (equivalente a 35 mm) f/2,8 – f/4,8
Zoom	zoom óptico de 12 aumentos, zoom digital avanzado de 4,2 aumentos, alcance total del zoom de 50 aumentos
Estabilizador imagen	de óptico
Velocidad obturador	del de 1/2 a 1/1000 seg. en incrementos de 1/3
LCD	pantalla TFT en color de 64 mm (2,5 pulg.) y alta resolución (115.000 píxeles) para uso en interior y exterior, con 5 niveles de ajuste del brillo
Visor	electrónica de alta resolución (230.000 píxeles), campo de visión del 100%
Almacenamiento	Memoria interna de 32 MB ^[1] disponible, ranura de ampliación para tarjetas SD/MMC
Enfoque automático	
Tipo de enfoque	Sistema de imagen TTL-AF
Modos	enfoque automático normal, automático de primeros planos, automático de infinito y manual

Alcance focal	gran angular automático: de 0,5 m (1,6 pies) a infinito teleobjetivo automático: de 1,2 m (3,9 pies) a infinito macro, gran angular: de 12 a 60 cm (de 4,7 pulg. a 2,0 pies) macro, teleobjetivo: de 60 cm a 1,3 m (de 2,0 pies a 4,3 pies)
Enfoque	sencillo, continuo
Zonas de enfoque automático	enfoques: automático con TTL de varias zonas, automático centrado, automático de zona seleccionable (5 zonas)
Luz de asistencia de enfoque automático	sí
Control de exposición	
Sensibilidad ISO	automático, 80, 100, 200, 400, 800, 1.600, 3.200[2]
Modos de medición	multimodo, compensación en el centro, punto (pistas de zonas con 5 zonas de enfoque)
Compensación	±2,0 EV con incrementos de 1/3 EV
Sucesión	±1,0 EV en incrementos de 1/3 EV, 3 imágenes
Bloqueo de la exposición automática	cuando el disparador se presiona
Histograma	visualización directa, visualización rápida y revisión
Balance de blancos	automático, luz natural, tungsteno, fluorescente, sombras
Flash	
Alcance	de 0,5 a 4,7 m (de 1,6 a 15,4 pies) en gran angular, ISO 140 de 1,2 a 2,7 m (de 3,9 a 8,9 pies) en teleobjetivo, ISO 140
Modos	automático, preflash para reducción de ojos rojos, de relleno, desactivado
Compensación	de -1 a +1 EV en incrementos de 1/3
Especificaciones de disparo	
Modos de disparo automático	disparo único, ráfaga (primeras imágenes) (hasta 6 fotogramas a 2 fps), ráfaga (últimas imágenes) (hasta 6 fotogramas a 2 fps), disparador automático (10 seg.), disparador automático de dos disparos (10 seg.), retraso del obturador (2 seg.), sucesión de exposiciones (3 disparos)
Modos de disparo	en movimiento, SCN, escena inteligente con valores altos de ISO mediante el automático, P (programa), A (prioridad de diafragma), S (prioridad de obturador), M (manual), vídeo
Modos de escena	retrato, retrato nocturno, paisaje, paisaje nocturno, flor, atardecer, contraluz, luz de velas, museo, texto, playa, nieve, fuegos artificiales, niños, imagen panorámica
Clic para capturar	< 0,26 segundos (previsualización activada) gran angular
De fotografía a fotografía	< 1,2 segundos
Toma de fotografías	
Formato de fotografías	JPEG/EXIF v2.21
Tamaño de la imagen	7,1 MP (3.072 × 2.304): copias de hasta 76 × 102 cm (30 × 40 pulg.) 6,3 MP (3.072 × 2.048): 3:2, proporción optimizada para copias de 10 × 15 cm (4 × 6 pulg.) 5,0 MP (2.592 × 1.944): copias de hasta 50 × 76 cm (20 × 30 pulg.) 3,1 MP (2.048 × 1.536): copias de hasta 20 × 25 cm (8 × 10 pulg.) 2,2 MP (1.800 × 1.200): 3:2 2,1 MP (1.920 × 1.080): 16:9 1,2 MP (1.280 × 960): correo electrónico, copias de menor tamaño
Modos de color	color de alta densidad, color natural (predeterminado), color de baja densidad, sepia, blanco y negro

Nitidez	alto, natural (predeterminado), bajo
Opciones de revisión	ver por fecha, ver por álbum, ver por almacenamiento de la imagen, seleccionado, tecnología KODAK PERFECT TOUCH, recorte, protección o desprotección, proyección de diapositivas, copia, varias copias
Edición	recorte en la cámara, tecnología KODAK PERFECT TOUCH
Captura de vídeo	
Formato	MPEG 4 de QUICKTIME con grabación y reproducción de audio
Calidad	VGA (640 x 480 píxeles) a 30 fps; QVGA (320 x 240 píxeles) a 30 fps
Longitud	continuo de hasta 80 minutos en función de la capacidad de la memoria
Opciones de revisión	ver por almacenamiento de la imagen, seleccionado, protección, álbum, fecha; tomar fotografía, edición de vídeo, protección, impresión de imágenes (4, 9, 16 copias), marcalibros, proyección de diapositivas, copia, varias copias
Edición	realización de una fotografía desde un vídeo (1, 4, 9, 16 copias), recorte
Personalización	
Ajustes personalizados	brillo de la pantalla LCD, cuadrícula de captura de fotograma, control del estabilizador de imagen, vista rápida, ajuste del zoom digital avanzado, sensor de orientación, sonido, volumen, ajuste de fecha y hora, apagado automático, ajuste de la salida de vídeo, idioma, almacenamiento de imágenes, álbum
Compartir	
Favoritos	proyección de diapositivas, varias copias, menú de configuración, función Favoritos directa
Share (Compartir)	imprimir, imprimir todo, correo electrónico, Favoritos, cancelar impresión
Especificaciones físicas	
Interfaz de E/S	salida de audio/vídeo (NTSC o PAL, seleccionable por el usuario), interfaz exclusiva para bases para cámara o bases de impresión KODAK, conexión digital (USB 2.0)
Alimentación	bases KODAK EASYSHARE opcionales con un paquete de pilas recargables de ion-litio; una pila CRV3 de litio; pila recargable de ion-litio KODAK KLIC-8000 para cámara digital opcional
Botones específicos	interruptor de encendido, obturador, sintonizador de modo (valores altos de ISO, escena inteligente, en movimiento, SCN, P, A, S, M, vídeo, Favoritos), navegador del zoom, LCD/visor electrónico, disparo automático, enfoque, flash, información, revisión, navegador de cinco direcciones, Share (Compartir), menú, eliminar, rueda
Toma de trípode	estándar de 1/4 pulg.
Dimensiones	An. x Al. x Pr.: 4,1 pulg. x 2,9 pulg. x 2,7 pulg. (103,6 mm x 74,2 mm x 69,7 mm)
Peso	300 g (10,6 onzas)
Compatibilidad	
Compatibilidad con las bases	Consulte el gráfico de compatibilidad de bases
Impresión directa	Impresora fotográfica 500 KODAK EASYSHARE, compatible con el sistema de impresión IMAGELINK y PictBridge
Software	funciona con el software KODAK EASYSHARE

CÁMARA FOTOGRÁFICA CANON EOS 550D

Se trata de una cámara réflex de iniciación pero que incorpora gran cantidad de prestaciones propias de cámaras profesionales. Se trata de un modelo plenamente contrastado y de gran difusión. Su precio, para el 2012, ronda los 600€ incluyendo un objetivo estabilizado 18-55mm.



Con las siguientes características:

Shutter	
Tipo de disparador de la cámara	Electrónico
Características	
Megapixel	18.7 MP
Máxima resolución de imagen	5184 x 3456 Píxeles
Resolución de captura de imágenes fijas	JPEG: (L) 5184x3456 (M) 3456x2304, (S) 2592x1728 RAW: (RAW) 5184x3456
Tamaño de sensor de marco completo	22.3 x 14.9 mm
Tipo de sensor	CMOS
Proporción latitud-altura	3:2
Tipo de cámara	SLR Body
Formatos de imagen soportados	JPEG, Exif 2.2, RAW, DPOF, MOV
Enfocar	TTL-CT-SIR
Auto enfoque (AF) rayo de luz	✓
Modo de auto-enfoque (AF)	selective auto focus
Ajustes de enfoque	Auto / Manual
Exposición ligera	
Sensibilidad ISO	AUTO 100 - 6400
Tipo de exposición	manual, shutter priority AE, aperture priority AE
Medición de luz	evaluative, centre-weighted, spot
Flash	
Flash integrado	✓
Cierre de flash de exposición	✓
Modos de flash	Reducción de ojos rojos, Sincronización con la segunda cortinilla, auto, manual, Flash desactivado, GN
Memoria	
Tarjetas de memorias compatibles	sd, sdhc, sdx

Memoria interna	-					
Vídeo						
Máxima resolución de video	1920 x 1080 Píxeles					
Formatos de vídeo compatibles	MOV					
Motion JPEG, velocidad de cuadro	30 fps					
Audio						
Micrófono incorporado	-					
Visor						
Pantalla	LCD					
Resolución de la pantalla de la cámara	1040000 Píxeles					
Campo de visión	100 %					
Tamaño de pantalla en diagonal	76.2 mm (3 ")					
Ampliación	0.87 x					
Visor de imagen	Pentamirror, electrical					
Conectividad						
PictBridge	✔					
Número de puertos HDMI	1					
Cantidad de puertos USB 2.0	1					
Puertos de entrada y salida (E/S)	1x video 1x out 1x 3.5mm		HDMI	PAL/ NTSC mini		
Cámara fotográfica						
Reproducción con zoom	1.5x - 10x					
Color	Negro					
Histograma	✔					
Efectos fotográficos	Neutral					
Autodisparador	2 / 10 s					
Reproducción	slide show, single image, movie					
Equilibrio de blanco	auto, Tungsteno, Fluorescente, Nublado, Luz de día, modalidad de personalización, flash, Sombra					
Batería						
Tipo de batería	LP-E8					
Tecnología de batería	Lithium-Ion (Li-Ion)					
Características						
Digital-SLR	✔					
Sistema de lentes	EF/EF-S					
Interfaz	USB 2.0					
Sistemas operativos compatibles	Win XP (SP2/SP3) Mac OS X v10.4 - 10.6		/	Vista	/	7
Idiomas de soporte	EN, DE, FR, NL, Italiano, ES, DK, FI, NO, SE, JA, RU, PT, KO, PL, CZ, HU, TU, AR, UA, RO					
Sistema operativo/software						
Software incluido	ZoomBrowser Image Digital PhotoStitch EOS Picture Style Editor	EX Photo	/		ImageBrowser Processing Professional Utility	

Requisitos del sistema	
Mac, compatible	✓
Peso y dimensiones	
Peso	530 g
Ancho	128.8 mm
Profundidad	62 mm
Altura	97.3 mm
Condiciones ambientales	
Alcance de temperatura operativa	0 - 40 °C
Humedad relativa	0 - 80 %
Otras Características	
Diafragma	-
Velocidad de obturador	30 - 1/4000 s
Capacidad de vídeo	✓
35 mm, lente de cámara equivalente	-
Procesador	
Procesador incorporado	DIGIC 4

OBJETIVO CANON EF-S 18-55MM F/3.5-5.6 IS II



Especificaciones técnicas	
Tamaño de imagen	APS-C
Longitud focal equivalente a 35 mm	29-88
Ángulo de visión (horizontal, vertical, diagonal)	64° 30' - 23° 20', 45° 30' - 15° 40', 74° 20' - 27° 50'
Construcción del objetivo (elementos/grupos)	11/9
Nº de hojas del diafragma	6
Apertura mínima	22 - 38(36) ¹
Distancia mínima de enfoque (m)	0.25
Aumento máximo (x)	0,34 (a 55 mm)
Información de la distancia	Proporcionada
Estabilizador de imagen	4 pasos
Motor para el AF	Micro motor

Diámetro del filtro (mm)	58
Máx. diámetro x longitud (mm)	68,5 x 70
Peso (gr)	200
Aumento con el tubo de extensión EF12 II	0,64-0,23 ¹
Aumento con el tubo de extensión EF25 II	1-0,51 ¹
Parasol	EW-60C
Estuche flexible	LP814
Teleconvertidores EF 1,4x II y EF 2x II	NC

DISTANCIÓMETRO LÁSER LEICA DISTO A2

Se trata de un distanciómetro compacto y de pequeño tamaño. Las teclas facilitan las sumas, las sustracciones, el cálculo del área y el volumen hacen una medición rápida y muy fiable. Como todos los Leica Laser distanciómetros, el laser es claramente visible. Podrá apreciar el punto del láser, incluso si el objetivo está en un área de difícil acceso.



Especificaciones técnicas	
Cálculos de superficie y volumen	
Medición continua	
Constantes de suma y resta	
Iluminación de pantalla	
Provisto de una carcasa resistente a los impactos	
Rango de medición	de 0,05 hasta 60 m
Precisión:	± 1,5 mm a 60 m

TELÉFONO MOVIL HTC WILDFIRE

Se trata de un terminal de prestaciones medio-bajo que cuenta con un GPS integrado con la precisión de este tipo de dispositivos. Cuenta con Android 2.3 como sistema operativo y permite un buen funcionamiento de aplicaciones como OruxMaps.



SOFTWARE

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICOS

ARCGIS

ArcGIS es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG. Producido y comercializado por Esri, bajo el nombre genérico ArcGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. Estas aplicaciones se engloban en familias temáticas como ArcGIS

Server, para la publicación y gestión web, o ArcGIS Móvil para la captura y gestión de información en campo.

ArcGIS Desktop, la familia de aplicaciones SIG de escritorio, es una de las más ampliamente utilizadas, incluyendo en sus últimas ediciones las herramientas ArcReader, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox, ArcScene y ArcGlobe, además de diversas extensiones. *ArcGIS for Desktop* se distribuye comercialmente bajo tres niveles de licencias que son, en orden creciente de funcionalidades (y coste): ArcView, ArcEditor y ArcInfo.

SOFTWARE FOTOGRAMÉTRICO

AGISOFT PHOTOSCAN

Agisoft PhotoScan es una herramienta de modelado 3D a partir de imágenes destinado a crear el modelos 3D de calidad profesional a partir de imágenes fijas. Basado en la tecnología de reconstrucción 3D Multivisión, opera con imágenes arbitrarias y es eficiente tanto en condiciones controladas como no controladas. Las fotografías pueden tomarse desde cualquier posición de forma que un objeto para poder ser reconstruido debe ser visible en al menos dos fotos. El proceso de alineación de las tomas y la reconstrucción del modelo 3D son totalmente automatizados.

AGISOFT LENS

Agisoft Lens es un software que permite realizar la calibración de la cámara a partir del un damero regular mostrado sobre dispositivos LCD. El software está elaborado por AGISOFT al igual que PHOTOSCAN.

Agisoft lente estima los siguientes parámetros de calibración de cámara:

- FX, FY - longitud focal
- CX, CY - las coordenadas del punto principal
- K1, K2, K3, P1, P2 - coeficientes de distorsión radial, utilizando el modelo de distorsión de Brown

SV3DVISION

Se trata de un programa desarrollado por la Universidad de Salamanca, por el profesor Diego González Aguilera. El software permite trabajar en dos entornos: Simulación y realidad.

Tiene como objetivo básico el análisis dimensional a partir de una sola imagen. sv3DVision constituye un programa de carácter multidisciplinar que integra bajo tres entornos diferentes: Simulación, Realidad y Visualización, herramientas procedentes de la Fotogrametría Digital, la Visión Computacional y la Informática Gráfica.

El software tiene diversas aplicaciones en mundos tal diferente como el del arte y la criminología. Así, en el ámbito del patrimonio artístico esta herramienta permite reconstruir tridimensionalmente edificios históricos a partir de una imagen o de un simple boceto, mientras que en el terreno de la ingeniería civil resulta útil especialmente en la catalogación de puentes.

En cuanto a la recreación de escenas de crímenes, “Sv3DVision” constituye una herramienta eficaz para la criminología, ya que permite regresar al escenario y observar aquellos detalles que pudieron pasar desapercibidos, o tomar todas las medidas necesarias para la investigación, lo cual antes resultaba complicado dado el carácter efímero de la escena de un crimen.

PHOTOMODELER

Photomodeler es un software de reconstrucción 3D a partir de fotografías de un objeto o edificio. Se basa en el modelo de malla de polígonos, por el cual se designan puntos manualmente en las fotografías (normalmente vértices), y el programa calcula el punto de vista de cada fotografía y sitúa el objeto en un espacio de tres dimensiones virtual mediante triangulación. El programa es capaz de orientar las fotografías, crear puntos, rectas y planos y extraer texturas de las fotografías. El resultado se puede exportar después a otros programas como AutoCAD, ImageModel, Rhino, Google SketchUp, etc.

SOFTWARE DE NAVEGACIÓN EN CAMPO

ORUXMAPS

OruxMaps es una aplicación para que permite trabajar con mapas on-line y off-line a partir de la posición dada por el GPS de dispositivos móviles. Pueden verse mapas, importarlos, guardar rutas, guardar puntos, poner alarmas de cercanía sobre los puntos, tracks, etc.

Es altamente configurable lo que le permite ser utilizado como una aplicación cartográfica móvil más allá de sus objetivos iniciales en senderismo y mountain bike. Permite la exportación de datos a varios formatos.

SOFTWARE TRATAMIENTO LIDAR

LASTOOLS

Se trata de una interfaz de programación de aplicaciones basada en libLAS, que implementa la lectura y escritura de datos LiDAR en los formatos establecidos por la ASPRS. Las herramientas de LASTools son líneas de comando altamente eficaces que permiten procesar tanto archivos .las como archivos comprimidos .laz.

Destacan herramientas para subdividir los datos LiDAR, hacer recortes, leer los archivos cabecera, transformar a archivos.las, crear MDT, TIN, unir conjuntos de datos, convertir a shapefile, transformar en archivo de texto.

LP360 Y LP VIEWER

La herramienta de la empresa QCoherent es una de las más potentes desarrollada actualmente para trabajar con datos LiDAR en el entorno de ArcGIS. Permite realizar numerosas acciones con archivos .las directamente en ArcMap:

- Importar archivos ASCII, XYZ y archivos shapefile de puntos.
- Muestra el número de puntos total del archivo .las y el porcentaje de estos que muestra en el visualizador de ArcMap.
- Permite exportar con diversas opciones:
 - Tipo: de punto o ráster de elevación.
 - Formato: ASCII XYZ, .las, shapefile de puntos, .dgn de Microstation y .dxf de AutoCAD.
 - Atributos: x, y, z, intensidad, clasificación, fuente, retorno, número de retornos, ángulo de escaneado, datos y fecha de captura.
 - Filtros: selección de las clases estandarizadas de la ASPRS

Permite visualizar las propiedades del archivo .las: extensión, fuente, sistemas de coordenadas, simbología, clasificación, combinación de retornos, uso de líneas de ruptura, opciones de TIN...

- Genera automáticamente curvas de nivel, TIN, imagen de intensidad, extensión del conjunto de datos, combinaciones de retornos...
- Administrar los filtros que se pueden aplicar automáticamente y generar nuevos filtros personalizados.

LIDAR ANALYST

La extensión LiDAR Analyst es una de las más potentes, ya que permite desarrollar procesos de clasificación (entendida como separación de suelo y otras entidades) desde ArcGIS.

LiDAR Analyst está orientada al análisis, mientras que LP360 está más orientada a la integración de datos LiDAR en un SIG, así como su visualización e interpretación por parte de un usuario.

Se trata de una aplicación para la extracción de entidades en 3D de datos LiDAR desarrollada por Overwatch Geospatial de Trexton Systems.

No ha podido valorarse convenientemente, pues la casa commercial no respondió al correo de activación de la licencia gratuita.

FUSION

Es un software gratuito desarrollado por el Servicio Forestal y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Está orientado al análisis forestal con datos LiDAR, por lo que sus herramientas se centran exclusivamente en este ámbito. Trabaja con archivos ráster, archivos .las, shapefiles, archivos de cobertura .csv, MDT. FUSION también permite exportar archivos .las a otros formatos (ASCII, LDA...), pero no permite exportar a shapefile.

LASEDIT Y FUGRO VIEWER

Es un visor desarrollado por Cloud Peak Software. Incluye un algoritmo para la extracción de superficies que permite a los usuarios generar modelos del terreno y de superficie. Del mismo modo puede generar curvados y perfiles.

La nube de puntos se puede representar mediante diferentes atributos (clasificación, elevación, intensidad...). Tiene un visor en 3D.

Permite representar los datos por clases, crear perfiles del terreno y visualizar los datos en 3D.

La interfaz de Fugro Viewer es la misma que la de LASEdit. La única diferencia es que solo conserva las opciones de visualización y de representación de puntos por atributos, así como la opción en 3D. No permite realizar ningún tipo de análisis ni hay opción para exportar archivos .las a otros formatos.

ARCGIS10

El programa ArcGIS 10 de ESRI no permite visualizar, tratar, manipular o analizar archivos .las directamente. Esto se debe a que almacena los atributos en formato binario. En la versión 10.1 es posible trabajar directamente con ficheros LAS, si bien análisis realizados en la web dejan en mal lugar a ArcMAP 10.1 a la hora de ejecutar procesos con ficheros LAS frente a otras soluciones ya implementadas en la misma plataforma de ESRI como LP360.

TERRASCAN, TERRASOLID

Ambos de la familia tecnológica de Terrasolid, son soluciones de software que corren sobre Microstation. Su fuerte es su capacidad de producción, siendo el principal paquete de tratamiento en cuanto a número de usuarios.

SOFTWARE MODELIZACIÓN HIDRÁULICA

HEC-RAS

HEC-RAS, modelo de dominio público desarrollado del Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers), surge como evolución del conocido y ampliamente utilizado HEC-2, con varias mejoras con respecto a éste, entre las que destaca la interfase gráfica de usuario que facilita las labores de preproceso y postproceso, así como la posibilidad de intercambio de datos con el sistema de información geográfica ArcGIS mediante HEC-GeoRAS. El modelo numérico incluido en este programa permite realizar análisis del flujo permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre.

Características técnicas:

- Cálculo hidráulico de estructuras (puentes, aliviaderos, alcantarillas, etc.).
- Visualización gráfica de datos y resultados
- Edición gráfica de secciones.
- Ejecutable en entorno Microsoft Windows.

Aplicaciones:

- Modelación hidráulica en régimen permanente de cauces abiertos, ríos y canales artificiales.

HEC-GEORAS

HEC-GeoRAS es un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades para el procesamiento de datos geoespaciales en ArcGIS mediante una interfaz gráfica de usuario (GUI). La interfaz permite la preparación de datos geométricos para su importación en HEC-RAS. A esta parte se la conoce como preproceso en la modelización con HEC-GEORAS, HEC-RAS. En la fase de postproceso, los resultados de la simulación son exportados desde HEC-RAS e importados por HEC-GEORAS.

Para crear el archivo de importación, el usuario debe tener un modelo digital del terreno existente (MDT) del sistema del río en el formato ArcInfo (GRID o TIN). El usuario crea una serie de elementos lineales en relación al desarrollo de datos geométricos para HEC-RAS. Los temas creados son la línea central del cauce, las líneas de flujo centrales (opcional), márgenes, y líneas de corte transversal.

Otras capas pueden crearse adicionalmente desde HEC-GEORAS y utilizadas para extraer datos geométricos adicionales de importación en HEC-RAS. Estos temas incluyen el uso de la tierra, alineación del dique, áreas de flujo ineficaces y áreas de almacenamiento.

Datos de perfil de superficie de agua y velocidad exportados desde simulaciones de HEC-RAS pueden ser procesados por HEC-GeoRAS para análisis de GIS para cartografía de la llanura aluvial, cálculos de daños de inundación, restauración de ecosistemas y preparación y respuesta de advertencia de inundación.

La última versión de la aplicación HEC-GEORAS 10 corre sobre el software GIS de la casa ESRI ArcGIS 10.

El software puede descargarse, así como su documentación desde: <http://www.hec.usace.army.mil/software/HEC-RAS/HEC-GeoRAS.html>

HARDWARE

El desarrollo de este trabajo se ha realizado principalmente en un ordenador portátil, si bien para la obtención de los modelos procedentes de datos LIDAR se ha optado por utilizar un PC de escritorio.

ORDENADOR PORTÁTIL ACER ASPIRE 5740G



Especificaciones técnicas

Fabricante	ACER
Procesador	Core i3-330M2600 2.13,Ghz 1066MHz FSB)
Memoria RAM	1 DIMM de 4GB
Disco Duro	HDD 1TB
Tarjeta Gráfica	ATI Mobility Radeon HD5650 1GB
Sistema Operativo	Microsoft Windows W7 Home Premium

ORDENADOR DE SOBREMESA

Especificaciones técnicas

Fabricante	Clónico
Placa Base	Placa Base MSI P67A-C45, FA 650W
Procesador	Core i7-2600 3,4Ghz
Memoria RAM	2 DIMM de 4GB
Disco Duro	HDD 1TB
Tarjeta Gráfica	MSI N5500GTX-TI Cyclone II 1Gb GDDR5
Sistema Operativo	Microsoft Windows W7 Profesional

MEDIOS MATERIALES

Además de los medios descritos han sido utilizado otros medios en el proyecto, como:

- Vehículo utilitario.
- Trípode para nivel de burbuja.
- Nivel de burbuja.
- Escuadras
- Cintas métricas

METODOLOGÍA

Antes de definir la metodología, conviene recordar los objetivos marcados, estos son:

- Desarrollo de una metodología para el levantamiento de obras de fábrica en cauces fluviales mediante técnicas fotogramétricas.
- Construcción de Modelos Digitales mejorados para cálculos hidráulicos aplicados a una cuenca.

Con la generación de los siguientes productos finales:

- Inventario de obras de fábrica caracterizadas geométricamente en las cuencas descritas.
- Modelos digitales del terreno con las obras de fábrica incorporadas.
- Análisis hidráulico de la cuenca piloto.
- Análisis y conclusiones sobre la metodología empleada.

Diferenciaremos dos fases metodológicas. Una primera, que denominaremos como fase previa y consistirá en el análisis y ensayo de las diferentes alternativas para la realización de los trabajos. De esta fase previa se extraerán las conclusiones que servirán para definir una metodología acorde a los objetivos marcados. A la fase siguiente la denominaremos fase operativa, y en ella serán de aplicación las conclusiones extraídas de la fase previa

Diferenciaremos dos zonas de estudio, por un lado el Arroyo Rivillas y por otra la cuenca del Arroyo Calamón. Aplicaremos la fase previa metodológica al Arroyo Calamón y aplicaremos las conclusiones en la fase operativa en el Arroyo Rivillas.

FASE PREVIA. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

LEVANTAMIENTO DE OBRAS DE FÁBRICA EN CAUCES FLUVIALES MEDIANTE TÉCNICAS FOTOGRAMÉTRICAS

SOFTWARE FOTOGRAMÉTRICO. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Se han barajado las siguientes alternativas en cuanto al software fotogramétrico a emplear:

SV3DVISION

La principal ventaja de este software es la capacidad de extraer geometrías a partir de una única toma. Para ello resuelve la geometría de la perspectiva cónica de la toma fotográfica a partir de elementos horizontales y verticales definidos en la toma sobre los que se impone condiciones geométricas. Ayuda en la resolución del problema el tener un elemento de escala en la toma y conocer los parámetros métricos de la cámara con la que se realiza la toma.

De esta forma es posible llegar a poder “medir” sobre la imagen.

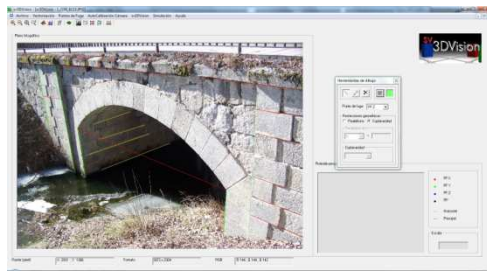
A partir de estos supuestos el software es muy interesante, ya no sólo por la posibilidad de obtener la geometría de forma fácil y rápida a partir de una toma, si no por la oportunidad de extraer información métrica de tomas del pasado en la que se han dado episodios de crecidas.

Para la familiarización con este software se ha seguido la documentación del taller “Análisis dimensional a partir de una sola imagen” impartido en el máster de postgrado oficial en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura.

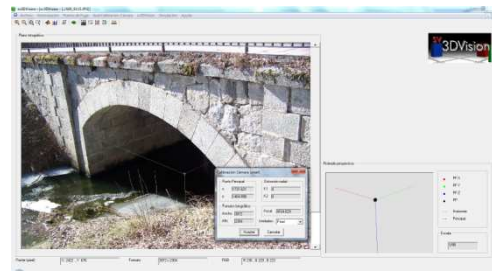
Una vez se ha llevado a cabo el entrenamiento con este software, se ha tratado aplicar las obras de fábrica en el cauce del Calamón.

En primer lugar se realizó un ensayo previo sobre una obra de fábrica de ejemplo. Esta no corresponde con el Arroyo Calamón, ya que se encuentra en Ávila, en la carretera de El Escorial. Sobre esta infraestructura se realizaron varias tomas de forma que pudieran servir de prueba.

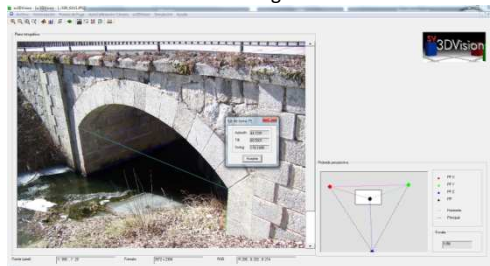
Sobre una de las imágenes se realizó el proceso descrito en el guión del taller:



Entrada manual de líneas de fuga



Cálculo de parámetros de la imagen



Autocalibración de la cámara

Llegado a este punto y una vez que se pretende realizar el análisis dimensional de la imagen empezamos a encontrar los primeros inconvenientes. El programa funciona bien en escenas que contengan paralelepípedos con planos verticales u horizontales bien diferenciados y en escenas donde puedan identificarse líneas con facilidad.

Las obras de fábricas en cauces, que serán objeto de análisis dimensional, no se caracterizan por la presencia de estos planos y líneas, más propias de edificios y grandes estructuras. Incluso en el caso del ejemplo, se trata de una de las obras con una traza geométrica mejor definida, en comparación con el resto.

Debido a la naturaleza de estas obras no es posible definir las restricciones necesarias para poder analizar las imágenes, siendo descartado este software en el análisis dimensional.

PHOTOMODELER

Se trata de uno de los software fotogramétricos de mayor difusión y más utilizados. Desde un primer momento se descartó su uso para el análisis dimensional de las obras de fábricas, debido a que se trata de un software más exigente en la toma de imágenes, desviándose de los objetivos de obtener la geometría de las obras de fábrica de forma sencilla y ágil.

Sin embargo si ha sido usado en la calibración de las cámaras utilizadas en el trabajo. En próximos apartados se valoran las alternativas para la calibración de cámaras fotográficas, desarrollando de forma más extensa la calibración con Photomodeler.

SOFTWARE DE MODELIZADO A PARTIR DE UNA Y MÚLTIPLES IMÁGENES EN FASE DE DESARROLLO POR PARTE DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN RECONOCIDO TIDOP DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CARTOGRÁFICA Y DEL TERRENO

En un principio se ofreció la posibilidad de usar este software en desarrollo por parte del grupo de investigación del Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno, si bien, la idea fue desechada, ya que el software PhotoScan ofrecía posibilidades similares y evitaba los inconvenientes de trabajar con software que aún se encuentra en desarrollo.

AGISOFT PHOTOSCAN

Agisoft Lens es un software complementario de Agisoft PhotoScan, que permite la calibración de cámaras fotográficas. Esta se realiza a través de una malla regular con forma de damero la cual es representada en un monitor.

El proceso se describe en el apartado de calibración de la cámara, siendo el resultado final del proceso, la obtención de los parámetros de calibración.

Agisoft PhotoScan es una herramienta destinada a crear los modelos 3D de alta calidad a partir de imágenes fijas. Basado en la tecnología de reconstrucción 3D Multivisión, opera con imágenes arbitrarias y es eficiente tanto en condiciones controladas como no controladas. Las fotografías pueden tomarse desde cualquier posición. Para que un objeto pueda ser reconstruido debe ser visible en al menos dos imágenes. El proceso de alineación de las tomas y la reconstrucción del modelo 3D están totalmente automatizados.

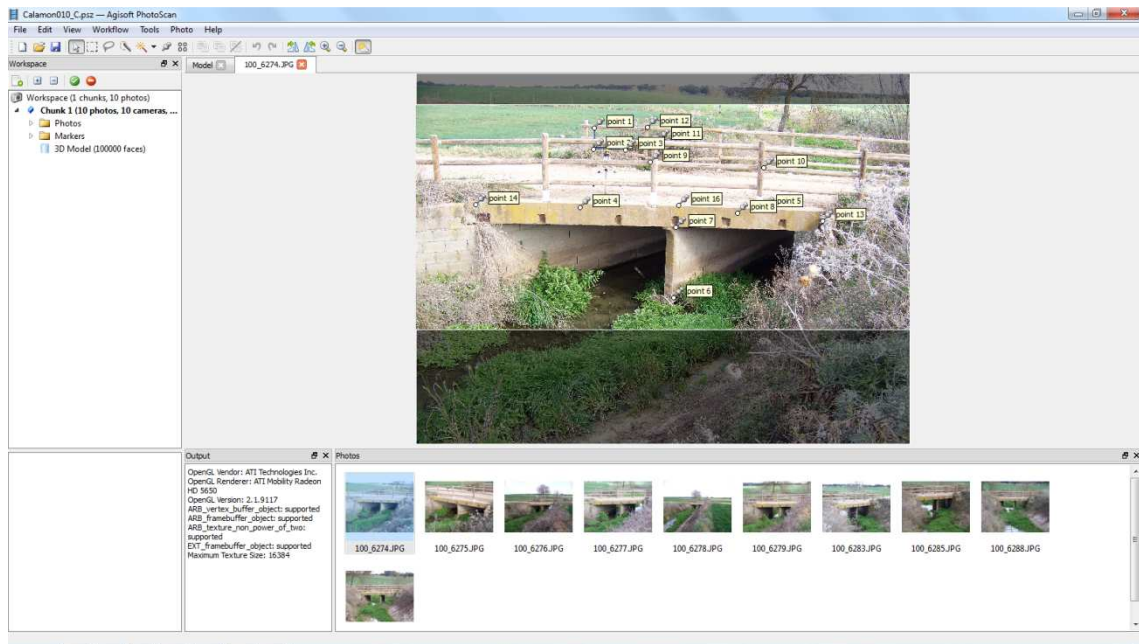
Tanto Agisoft Lens como Agisoft PhotoScan sorprenden por la facilidad de uso y la capacidad de obtener buenos resultados con un entrenamiento moderado. La ayuda es buena y existen foros y comunidades en internet que explican los trabajos desarrollados, muchos de ellos con fines profesionales.

No obstante, a medida que vamos trabajando con el software van obteniéndose mejores resultados. También hay aspectos que podrían ser mejorables y sobre los cuales llamaremos la atención.

Sin pretender generar un guión o un documento de referencia en el uso de esta herramienta, ya que para ello ya existen los manuales y documentación en la página web (<http://www.agisoft.ru/tutorials/photoscan>), explicaré brevemente el funcionamiento de la aplicación y las conclusiones a las que he llegado en la fase de entrenamiento con esta herramienta.

En esta fase las tomas fotográficas han sido realizada con la cámara KODAK Z712IS.

Interfaz de la aplicación



Flujo de la aplicación

Básicamente, podemos resumirlo en:

1. **Carga de imágenes.**

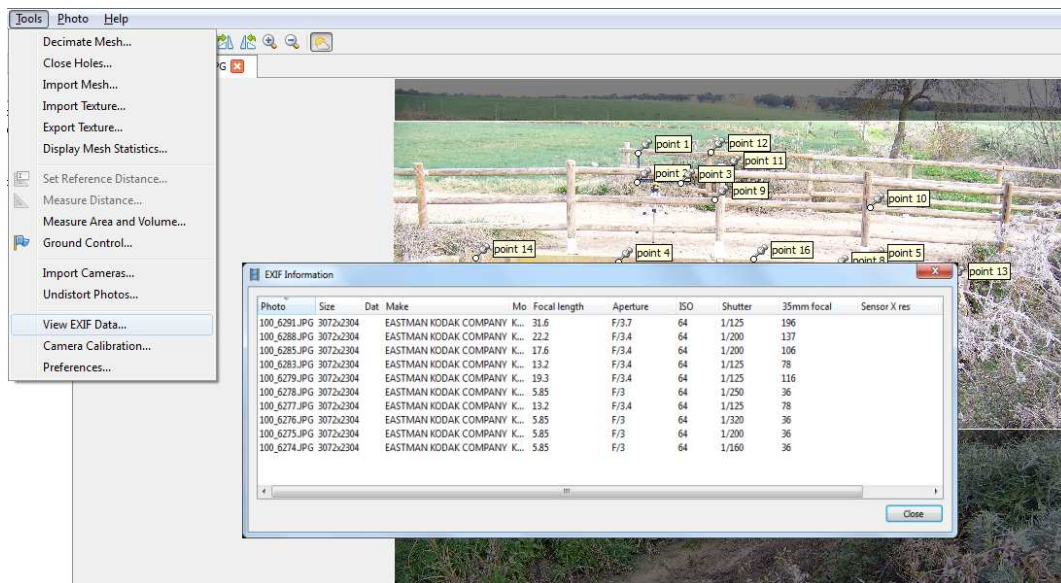
Una vez cargada las imágenes, estas se muestran en la parte inferior de la pantalla en el marco denominado “Photos”. Es muy importante que las imágenes utilizadas tengan los ficheros EXIF con la información de captura de las imágenes.

2. **Definición de parámetros.**

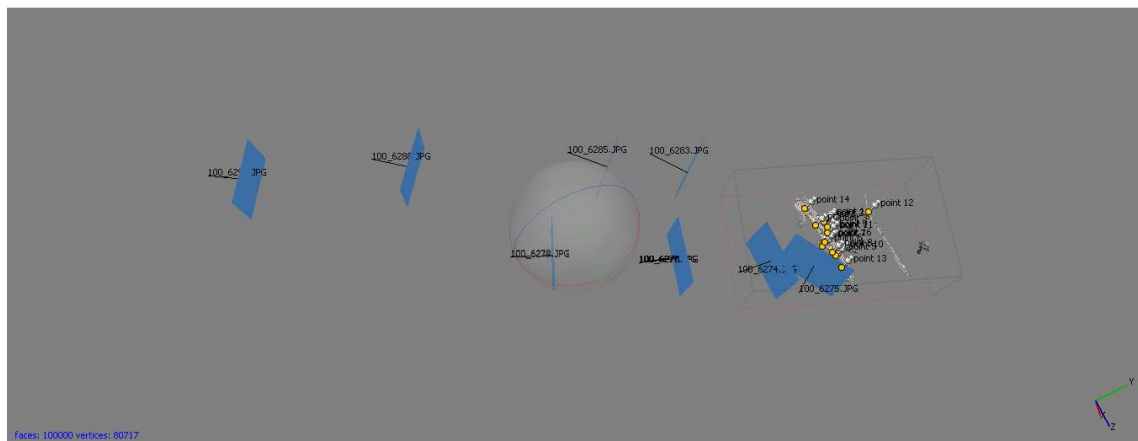
- a. Calibración de las tomas

Según hemos podido observar en el entrenamiento con el software y según se explica en la propia documentación, en la mayoría de ocasiones basta con los datos de focal dado en los ficheros EXIF para poder realizar la alineación de las tomas, sin embargo, en algunos casos hemos podido comprobar como una buena definición de la calibración de las tomas favorece la alineación.

La información dada por los ficheros EXIF puede consultarse en:

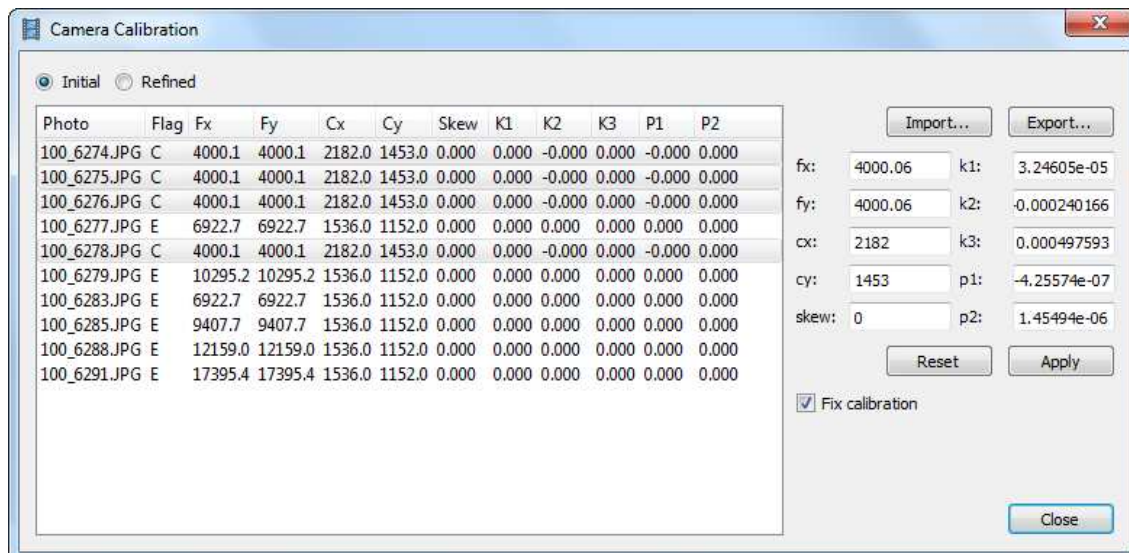


Debido a la situación de las obras de fábrica respecto al cauce, obras con un dimensión transversal pequeña en comparación con la dimensión longitudinal del cauce, mucho mayor, es necesario realizar imágenes a una cierta distancia, obligando por tanto a utilizar diferentes focales o niveles de zoom para poder conseguir imágenes nítidas.



La aplicación permite para cada una de las diferentes tomas introducir e importar los datos de calibración por cada focal utilizada.

En el siguiente gráfico se importa la calibración para las tomas con focal de 35mm.



Al realizar la Alineación (en pasos posteriores) se recalcula la calibración, salvo que sea marcada la opción *Fix Calibration*, en cuyo caso respeta la calibración anterior y realiza el ajuste con los valores dados.

Lamentablemente, cuando se marca la opción *Fix Calibration* la calibración se fija para todas las tomas y no únicamente para las que se ha introducido.

Ante esta situación, en algunos casos, se ha adoptado la estrategia de calibración de la cámara a posteriori. Para ello en las tomas de campo procuraremos realizar las tomas con el menor número de focales diferentes, es decir, podemos utilizar la focal de 36mm. y para las tomas con zoom utilizar siempre la misma focal. De esta forma podemos calibrar la cámara en gabinete, ya que el proceso es bastante rápido.

No obstante y como pondremos de manifiesto en la descripción de los procesamientos de las escenas, la calibración no tiene una influencia significativa en la precisión obtenida en el modelo. Tiene mucho mayor impacto en otro paso mucho más importante, que es el de la Alineación, ya que en algunas ocasiones el software no es capaz de reconstruir la geometría de toma, sobre todo cuando hay gran variedad de focales.

Sin embargo, ha habido otras ocasiones, en la que introducir la calibración en las tomas los resultados no han sido los esperados, teniendo grandes dificultades o siendo incapaz de resolver la alineación.

b. Filtrado de imágenes por máscara

Otro factor que se ha convertido en determinante, es la necesidad de aplicar máscaras sobre las tomas. Tengamos en cuenta que el software realiza un *matching* entre las diferentes tomas de forma que si prescindimos de las zonas sin interés, tendremos que con la misma capacidad de procesamiento los procesos serán mucho más rápidos.

También queda comprobado que el ajustar la zona a la obra de fábrica favorece la alineación de imágenes, ya que focaliza la atención de los algoritmos sobre las obras de fábrica.



Además existe otro factor limitante y es la memoria de la máquina donde se ejecuta el software. En alguna ocasión en que el número de tomas ha sido elevado, ha sido necesario disminuir el número de imágenes para permitir el procesado.

3. **Alineación** de las imágenes:

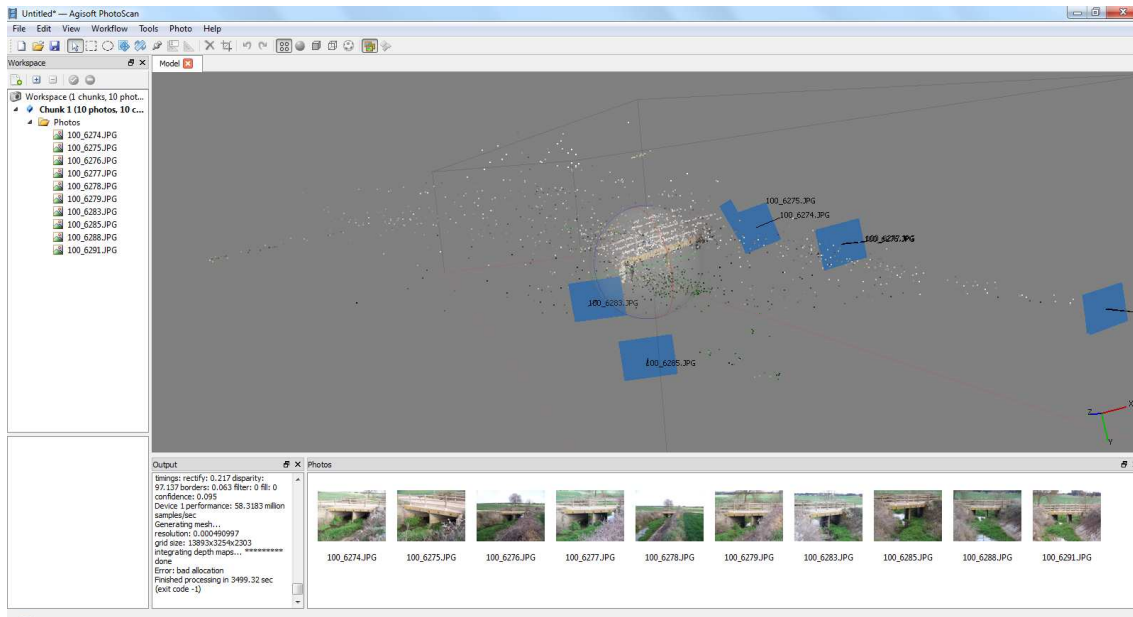
Ya hemos ido hablando en los puntos anteriores sobre el proceso de Alineación. Es este, sin duda, el proceso más delicado y cuyos resultados son más determinantes. Sin embargo, es uno de los procesos donde menos alternativas tenemos en gabinete, salvo la posibilidad de calibrar la cámara para la focal seleccionada tratar de ajustar las máscaras.

En las opciones que tenemos siempre seleccionaremos la opción de mayor precisión, utilizaremos las máscaras si previamente las hemos dibujado sobre las tomas. En cuanto a la opción *Pair Preselection*, utilizaremos siempre la opción *Disabled*.

Una vez realizado el proceso, se nos muestra la orientación relativa de las diferentes tomas y una representación de alguno de los puntos utilizados en el *matching*.

Otra cuestión importante a considerar es el número de tomas suficiente para conseguir una modelización adecuada.

Se han realizado diferentes ensayos con diferentes número de tomas, diferentes geometrías y/o diferentes focales. Los mejores resultados se obtienen con tomas lo más perpendiculares posibles al objeto, si bien admite tomas con grados de convergencia elevados. En cuanto al número de tomas es preciso de contar con al menos 3 tomas, si bien se recomienda 4 ó más, pero teniendo en cuenta la capacidad de procesamiento de la computadora.

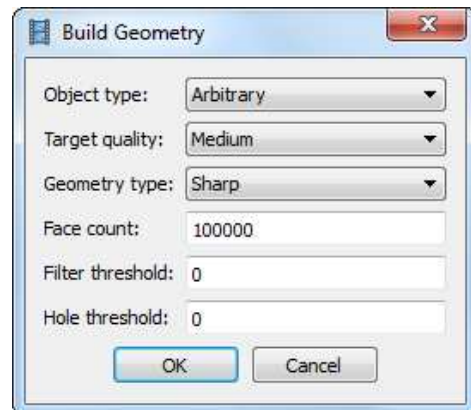


4. Construcción de la Geometría.

Al igual que en el proceso de Alineación esta opción es automática. Sí, podemos controlar el número máximo de caras del objeto a representar y la precisión de estas. A mayor precisión y número de caras mayor será el tiempo que va a necesitar la aplicación.

Debemos tener en cuenta que nuestro objetivo es obtener una modelización de las estructuras y por tanto no tenemos mayor interés en bajar a un gran nivel de detalle.

Es muy recomendable realizar una primera reconstrucción de ensayo, poco exigente y que nos permita en pequeño periodo de tiempo hacernos una idea del resultado final.



Una vez comprobemos que el modelo se genera correctamente, utilizaremos opciones que permiten resultados de mayor precisión.

5. Sistema de Coordenadas del modelo.

Una vez generado el modelo podremos escoger entre las diferentes opciones de escalar y referenciar el modelo. Podríamos escoger entre definir un sistema de coordenadas con varios puntos o introducir una distancia entre dos puntos de control de forma que se escale el modelo.

En este sentido, y siendo necesario la integración de los modelos en otros modelos cobra gran importancia dos factores.

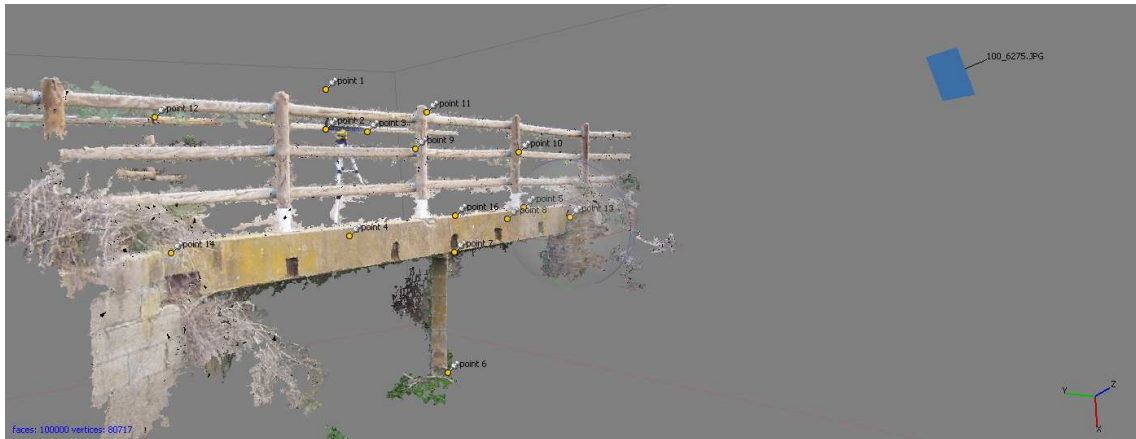
Por un lado la escala del modelo, para lo que puede bastar con medir una distancia en la escena. El otro



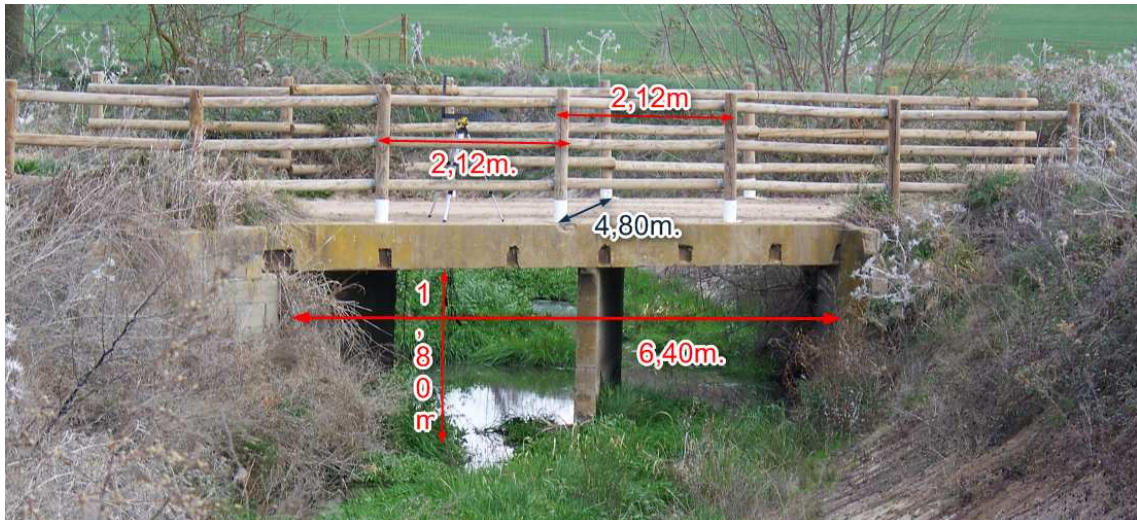
factor a tener en cuenta es la verticalidad del modelo, siendo este objetivo más complejo y habiéndonos ayudado de diferentes medios auxiliares.

Uno de los medios auxiliares probados con éxito fue la combinación de una escuadra de dimensiones conocidas y un nivel, montados sobre un trípode dotado de tornillos que permiten horizontalizarlos.

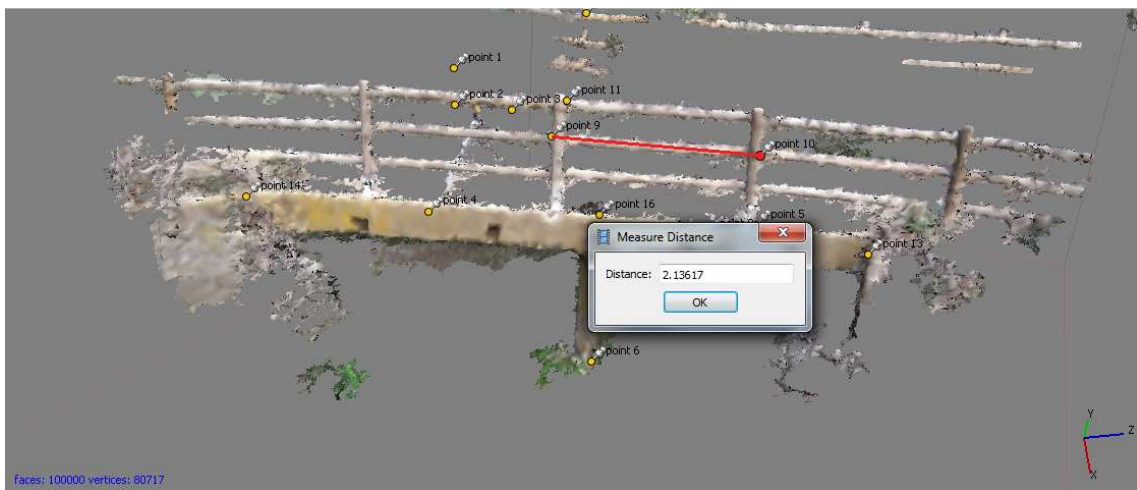
Los resultados fueron aceptables al dotar de coordenadas locales a la escena, pero el montaje de los sistemas auxiliares requiere de tiempo que penaliza la rapidez que se pretende con la presente metodología.



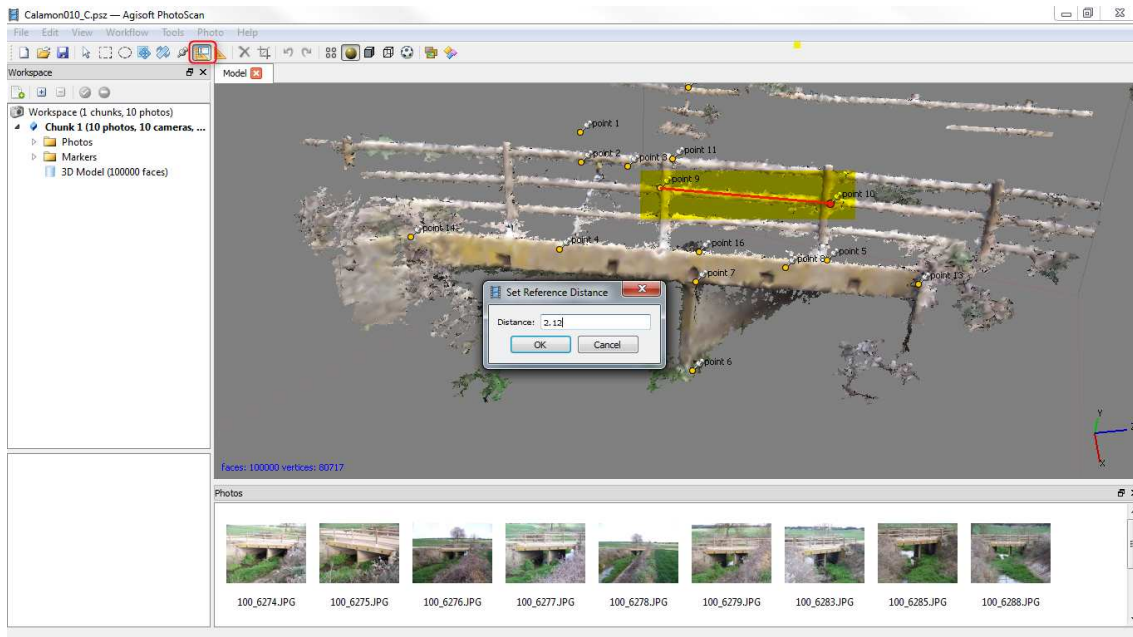
Por ejemplo, después de dotar de coordenadas a la escena a partir de la escuadra horizontalizada, se comparan diferentes distancias de referencia medidas en campo según croquis.



Comparamos las medidas con las obtenidas desde el modelo:



La alternativa seguida ha sido la de dar escala al modelo a partir de una distancia conocida. Para ello, se señalan bien sobre el modelo, bien sobre cada una de las tomas los puntos de control con la herramienta correspondiente. Posteriormente se procede a entrar una medida conocida apoyada sobre los puntos de control.



Se selecciona la herramienta “Set Reference Distance” señalada con un recuadro rojo y se referencia el modelo quedando escalado.

A partir del modelo 3D obtenemos tantas medidas como la reconstrucción nos permita de forma que podemos reconstruir la geometría de la estructura.

6. Texturizado.

Dado que el fin del presente proyecto es la obtención de la geometría de la obra de fábrica, prescindiremos de darles texturas a los modelos geométricos.

CÁMARAS FOTOGRÁFICAS. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

KODAK Z712IS

Esta cámara ha sido descrita en el apartado de instrumental. Se trata de una cámara compacta cuyas principales características son la de poseer un objetivo integrado de focales equivalentes a 36mm. a 432mm. y una resolución 7.1 megapíxeles.

Presenta como grandes inconvenientes el tener una focal que de partida de 35mm. un campo de imagen inferior a otras focales. También es mejorable la resolución.

CANON EOS 550D + OBJETIVO CANON 18-55IS

En principio no se contemplaba esta cámara como alternativa, pero los resultados arrojados en la modelización mediante el software con la cámara KODAK de inferiores prestaciones, han aconsejado realizar pruebas con esta cámara de mayores prestaciones. Las características técnicas han sido descritas en el apartado de medios auxiliares.

Las principales ventajas, frente a la otra alternativa, están en tener la posibilidad de trabajar con una focal menor, teniendo mayor campo de imagen y el contar con una mayor resolución.

Por el contrario, puede presentar los inconvenientes de necesitar mayor potencia de cálculo, que se puedan traducir en problemas por falta de memoria. Otro inconveniente a considerar es que al trabajar con focales menores la lente introduce mayores distorsiones, pudiendo obligar a tener que calibrar la cámara para las distintas focales utilizadas.

En cualquier caso se plantea realizar las tomas con la focal fija a 18mm.

CALIBRACIÓN DE LAS CÁMARAS. ALTERNATIVAS

Con la aparición y popularización de la fotografía digital se ha presentado un nuevo escenario del que también ha podido beneficiarse la fotogrametría. Ya no siempre es necesario disponer de cámaras métricas que garanticen la reconstrucción del modelo relativo para obtener resultados que permitan extraer datos métricos.

Por calibración entendemos, desde el punto de vista fotogramétrico, un proceso en que se tratan de determinarse los parámetros geométricos (distancia focal y coordenadas del punto principal) y físicos (parámetros de distorsión radial y tangencial) de la toma de las fotografías. Podrían también ser objeto de calibración la planaridad del plano imagen y del plano focal.

CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA FOTOGRÁFICA KODAK Z712IS

Esta cámara tiene el inconveniente de no poder disponer de objetivos con focal fija, ya que el objetivo está integrado con la cámara y permite un amplio rango de zoom con focales equivalentes desde los 36 a los 432mm. Para tener una calibración completa de la cámara sería necesario realizar una calibración para todo el rango de focales admitidas. Este punto, además de ser poco operativo introduce incertidumbre debido a los posibles desajustes mecánicos del propio objetivo. No conocemos con que precisión la cámara es capaz de informarnos sobre la focal.

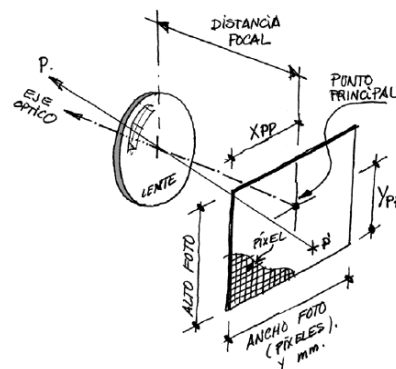
En un principio se pensó en realizar todas las tomas fotográficas utilizando una única focal, en concreto la focal de 36mm., la cual, al ser la menor de todas las posibles hace que se pueda suponer mayor precisión en la focal del objetivo. Posteriormente y una vez en gabinete quedó patente la necesidad de utilizar diferentes niveles de zoom para poder representar diferentes escenas 3D de las obras de fábrica. La configuración de los objetos, obras de fábrica en cauces, hace aconsejable realizar en ocasiones tomas a media distancia de forma que se maximice la resolución del objeto

CALIBRACIÓN DE CÁMARA CON AGISOFT LENS

Agisoft Lens es un software que permite realizar la calibración de la cámara a partir de un damero regular mostrado sobre dispositivos LCD. El software está elaborado por AGISOFT al igual que PHOTOSCAN.

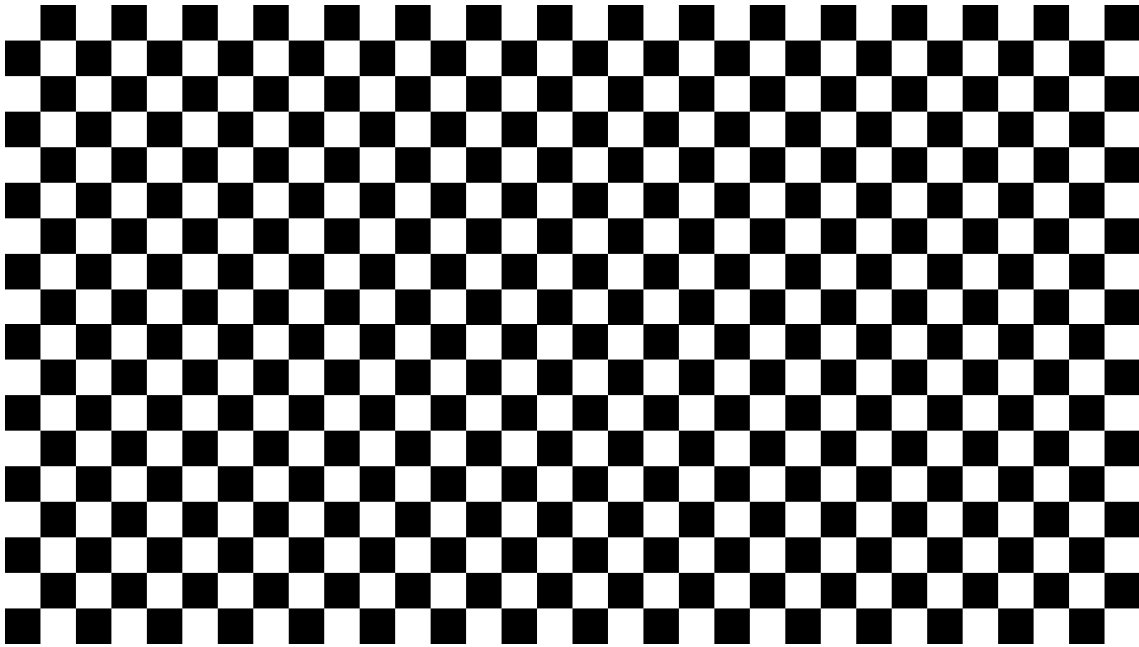
Agisoft lente estima los siguientes parámetros de calibración de cámara:

- FX, FY - longitud focal
- CX, CY - las coordenadas del punto principal
- K1, K2, K3, P1, P2 - coeficientes de distorsión radial, utilizando el modelo de distorsión de Brown



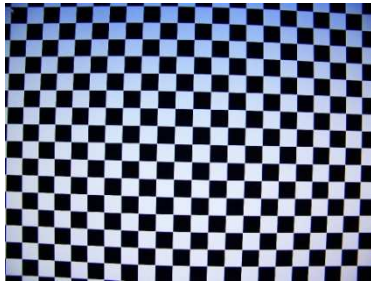
El flujo del programa es realmente sencillo y la ayuda más que suficiente. En esta se encuentran descritos los pasos necesarios para realizar la calibración.

Una vez se muestra en pantalla la retícula de calibración, esta debe fotografiarse al menos en 3 ocasiones desde posiciones diferentes procurando que el damero ocupe en la toma la mayor parte de la superficie posible.

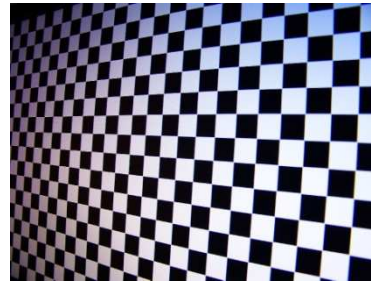


Malla de calibración de Agisoft Lens 1

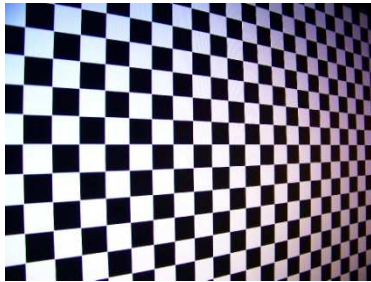
Se han realizado 5 tomas desde diferentes posiciones. Realizadas la tomas el software trata las imágenes originales y realiza la calibración automáticamente.



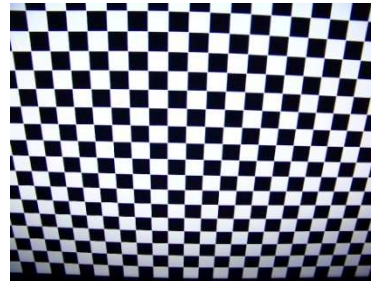
Calibración Agisoft. Toma 1



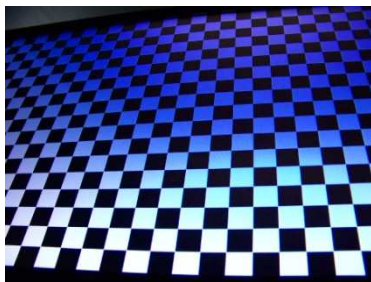
Calibración Agisoft. Toma 2



Calibración Agisoft. Toma 3



Calibración Agisoft. Toma 4



Calibración Agisoft. Toma 5

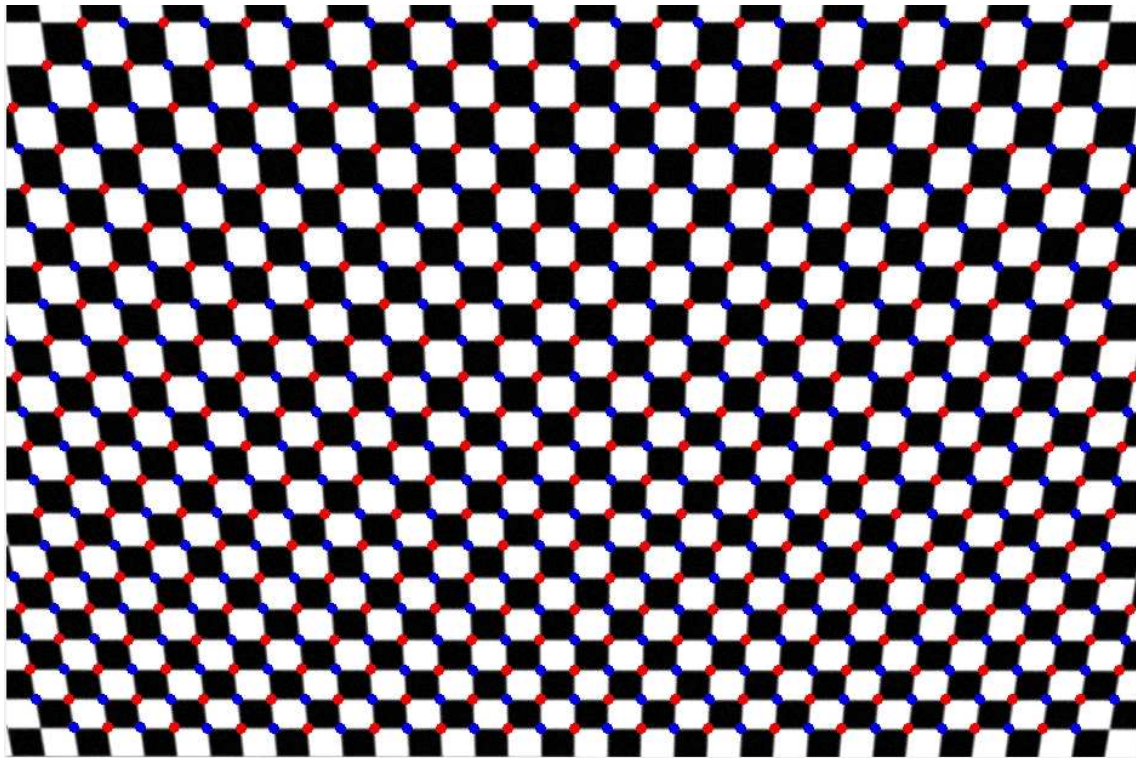
A continuación se relacionan las características de cada una de las tomas mediante el contenido del fichero EXIF:

Filename	100_6254.JPG	100_6255.JPG	100_6256.JPG	100_6257.JPG	100_6258.JPG
Make	EASTMAN KODAK COMPANY	EASTMAN KODAK COMPANY	EASTMAN KODAK COMPANY	EASTMAN KODAK COMPANY	EASTMAN KODAK COMPANY
Model	KODAK Z712 IS ZOOM DIGITAL CAMERA	KODAK Z712 IS ZOOM DIGITAL CAMERA	KODAK Z712 IS ZOOM DIGITAL CAMERA	KODAK Z712 IS ZOOM DIGITAL CAMERA	KODAK Z712 IS ZOOM DIGITAL CAMERA
Orientation	Top left	Top left	Top left	Top left	Top left
XResolution	480	480	480	480	480
YResolution	480	480	480	480	480
ResolutionUnit	Inch	Inch	Inch	Inch	Inch
YCbCrPositioning	Centered	Centered	Centered	Centered	Centered
ExifOffset	506	506	506	506	506
ExposureTime	1/30 seconds	1/30 seconds	1/30 seconds	1/30 seconds	1/25 seconds

FNumber	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
ExposureProgram	Normal program	Normal program	Normal program	Normal program	Normal program
ISOSpeedRatings	100	160	200	200	400
ExifVersion	221	221	221	221	221
DateTimeOriginal	2012:03:01 19:01:22	2012:03:01 19:01:35	2012:03:01 19:01:50	2012:03:01 19:01:59	2012:03:01 19:02:20
DateTimeDigitized	2012:03:01 19:01:22	2012:03:01 19:01:35	2012:03:01 19:01:50	2012:03:01 19:01:59	2012:03:01 19:02:20
ComponentsConfiguration	YCbCr	YCbCr	YCbCr	YCbCr	YCbCr
ShutterSpeedValue	1/32 seconds	1/32 seconds	1/32 seconds	1/32 seconds	1/25 seconds
ApertureValue	F 2.83	F 2.83	F 2.83	F 2.83	F 2.83
ExposureBiasValue	0	0	0	0	0
MaxApertureValue	F 2.83	F 2.83	F 2.83	F 2.83	F 2.83
MeteringMode	Multi-segment	Multi-segment	Multi-segment	Multi-segment	Multi-segment
LightSource	Daylight	Daylight	Daylight	Daylight	Daylight
Flash	Flash not fired, compulsory flash mode	Flash not fired, compulsory flash mode	Flash not fired, compulsory flash mode	Flash not fired, compulsory flash mode	Flash not fired, compulsory flash mode
FocalLength	5.85 mm	5.85 mm	5.85 mm	5.85 mm	5.85 mm
FlashPixVersion	100	100	100	100	100
ColorSpace	sRGB	sRGB	sRGB	sRGB	sRGB
ExifImageWidth	3072	3072	3072	3072	3072
ExifImageHeight	2304	2304	2304	2304	2304
InteroperabilityOffset	10562	10562	10562	10562	10562
ExposureIndex	100	160	200	200	400
SensingMethod	One-chip color area sensor	One-chip color area sensor	One-chip color area sensor	One-chip color area sensor	One-chip color area sensor
FileSource	Other	Other	Other	Other	Other
SceneType	Other	Other	Other	Other	Other
CustomRendered	Normal process	Normal process	Normal process	Normal process	Normal process
ExposureMode	Auto	Auto	Auto	Auto	Auto
White Balance	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual
DigitalZoomRatio	0.00 x	0.00 x	0.00 x	0.00 x	0.00 x
FocalLengthIn35mmFilm	36 mm	36 mm	36 mm	36 mm	36 mm
SceneCaptureType	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
GainControl	Low gain up	Low gain up	High gain up	High gain up	High gain up

Contrast	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Saturation	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Sharpness	Hard	Hard	Hard	Hard	Hard
SubjectDistanceRange	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown
Maker Note (Vendor):					
Thumbnail:					
Compression	6 (JPG)	6 (JPG)	6 (JPG)	6 (JPG)	6 (JPG)
Orientation	Top left	Top left	Top left	Top left	Top left
XResolution	72	72	72	72	72
YResolution	72	72	72	72	72
ResolutionUnit	Inch	Inch	Inch	Inch	Inch
JpegIFOffset	10866	10866	10866	10866	10866
JpegIFByteCount	14305	12075	11918	14276	13074

El software analiza cada una de las imágenes y calcula la intersección de las líneas que componen la retícula. Se muestra como muestra en pantalla el cálculo de estas intersecciones.



Malla de calibración de Agisoft Lens 2



Malla de calibración de Agisoft Lens 3

Se aplica la calibración dada por los siguientes algoritmos:

Camera model

Agisoft Lens software uses a pinhole camera model for lens calibration. The distortions are modeled using Brown's distortion model.

The camera model specifies the transformation from point coordinates in the local camera coordinate system to the pixel coordinates in the image frame.

The local camera coordinate system is selected with the origin at the camera projection center. The Z axis points towards the viewing direction, X axis points to the right, Y axis points down.

The image coordinate system has the origin at the top left image pixel, with the center of the top left pixel having coordinates (0.5, 0.5). The X axis in the image coordinate system points to the right, Y axis points down.

For the point with (X, Y, Z) coordinates in the local camera coordinate system, the projected coordinates in the image frame can be calculated using the following equations:

$$x = X / Z$$

$$y = Y / Z$$

$$x' = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_2(r^2 + 2x^2) + 2P_1xy$$

$$y' = y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_1(r^2 + 2y^2) + 2P_2xy$$

$$u = c_x + x'f_x + y'skew$$

$$v = c_y + y'f_y$$

where:

$$r = \sqrt{x'^2 + y'^2},$$

(X, Y, Z) - point coordinates in the local camera coordinate system,

(u, v) - projected point coordinates in the image coordinate system (in pixels),

(f_x , f_y) - focal lengths,

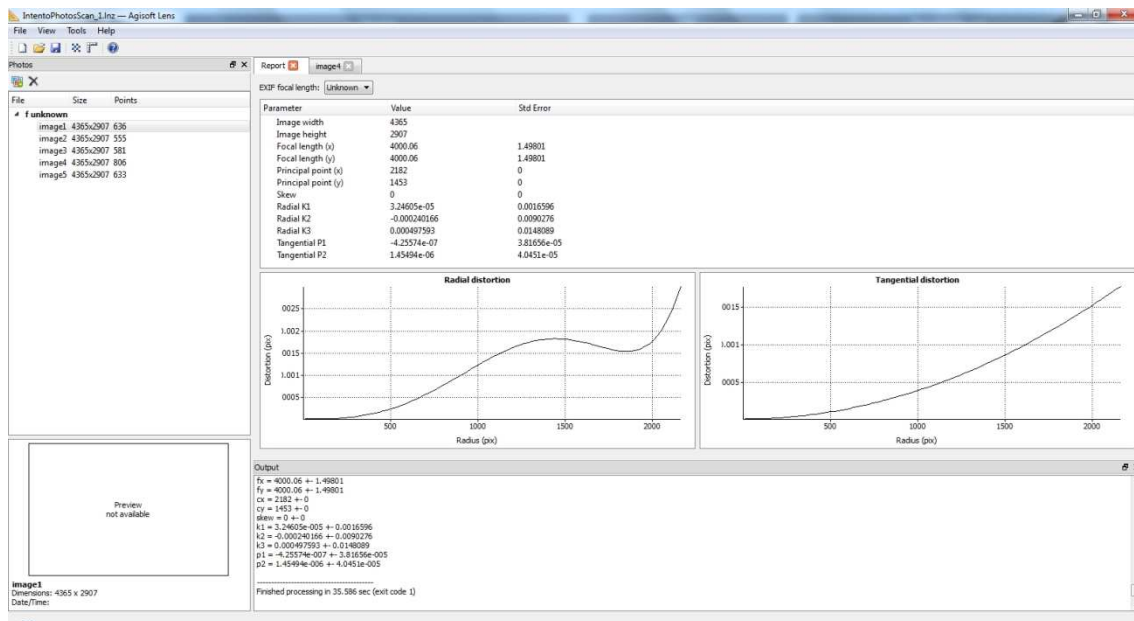
(c_x , c_y) - principal point coordinates,

K_1 , K_2 , K_3 - radial distortion coefficients,

P_1 , P_2 - tangential distortion coefficients,

skew - skew coefficient between the x and the y axis.

Los resultados de la calibración pueden guardarse en un fichero XML además de mostrarse en pantalla.



Resultado de calibración 1

Parameter	Value	Std Error
Image width	4365	
Image height	2907	
Focal length (x)	4000.06	1.49801
Focal length (y)	4000.06	1.49801
Principal point (x)	2182	0
Principal point (y)	1453	0
Skew	0	0
Radial K1	3.24605e-05	0.0016596
Radial K2	-0.000240166	0.0090276
Radial K3	0.000497593	0.0148089
Tangential P1	-4.25574e-07	3.81656e-05
Tangential P2	1.45494e-06	4.0451e-05

Resultado de calibración 2

CALIBRACIÓN DE CÁMARA CON PHOTOMODELER

Photomodeler es un software de Modelado, medición y escaneo 3D. PhotoModeler fotogrametría software proporciona modelado basado en imágenes, para la medición precisa y modelos 3D en ingeniería, arquitectura, cine, análisis forense y más.

El software facilita y desarrolla todas las fases del proceso de restitución fotogramétrica, desde la calibración de la cámara a la obtención de modelos 3D.

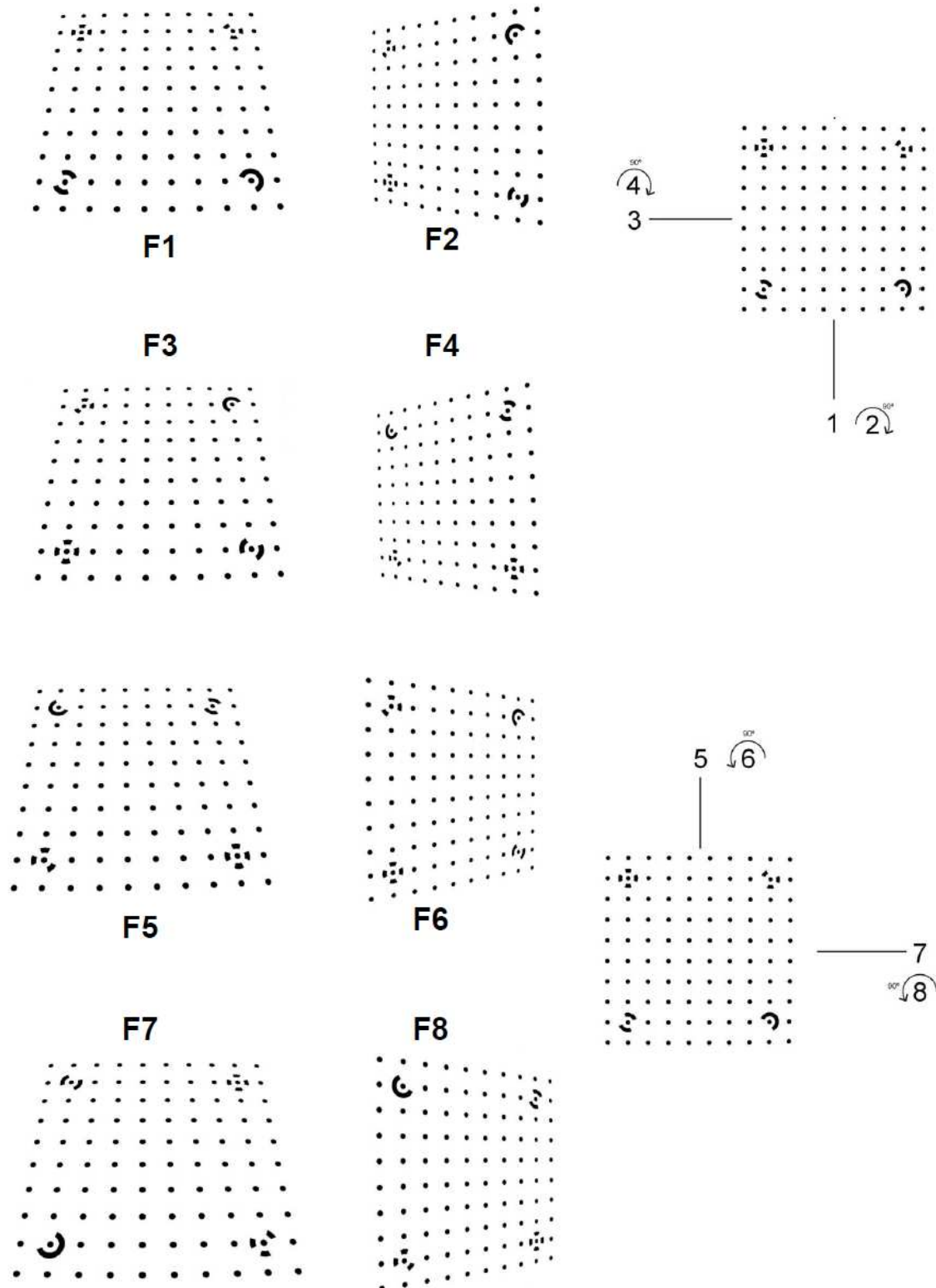
La cámara utilizada es la descrita en apartados anteriores, concretamente la cámara Kodak Z712IS. La calibración se realiza para una focal de 36mm.

Para realizar la calibración es necesario fotografiar con la cámara en varias posiciones una retícula proporcionada por el propio software. Esta debe situarse de forma que la superficie sea totalmente plana

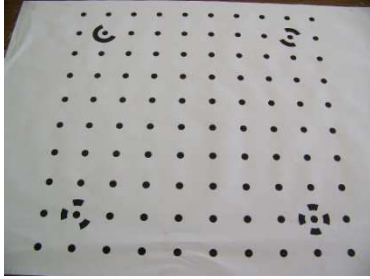
En este caso se dispuso la retícula sobre una mesa horizontal y se realizaron 3 tomas desde cada una de los lados de la retícula cuadrangular. La primera toma se realiza de forma que la fotografía tenga un formato apaisado. Las dos siguientes se realiza de forma que el eje mayor de la toma sea vertical y diferenciado en +90º y -90º sobre la primera toma.

Es importante destacar que hay que deshabilitar la opción de giro automático si la cámara dispusiera de él, pues en ese caso las tomas serían giradas automáticamente provocando confusión y la imposibilidad de realizar el calibrado.

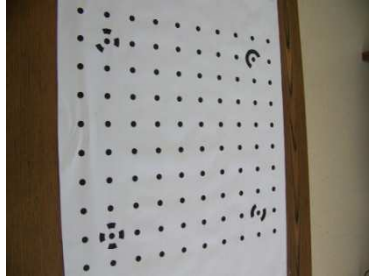
A continuación se muestran sendos gráficos sobre la operación de toma para el calibrado:



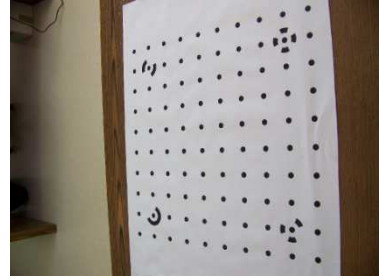
El resultado de las tomas se muestra en las siguientes tomas:



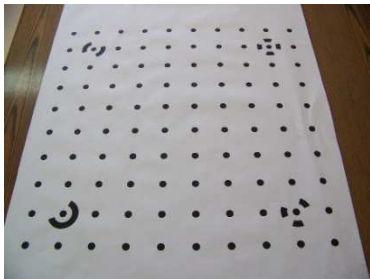
Cara 1. Toma Horizontal



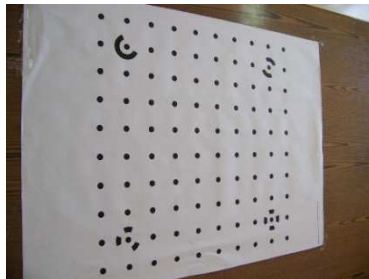
Cara 1- Toma Vertical 1



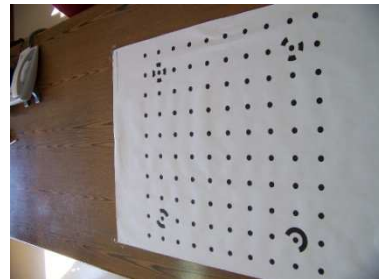
Cara 1- Toma Vertical 2



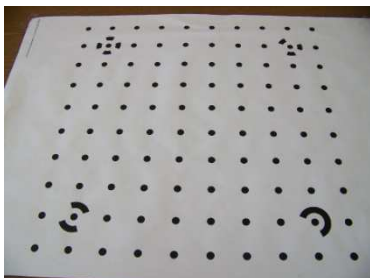
Cara 2. Toma Horizontal



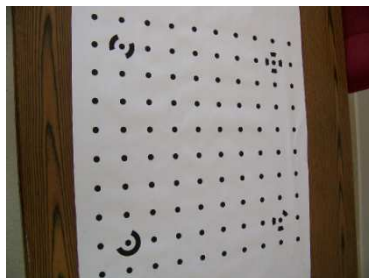
Cara 2- Toma Vertical 1



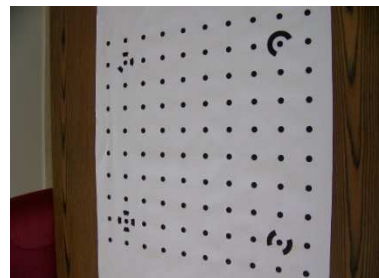
Cara 2- Toma Vertical 2



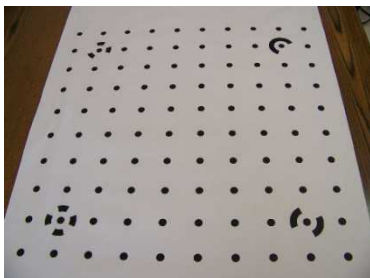
Cara 3. Toma Horizontal



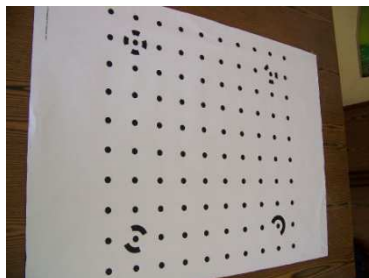
Cara 3- Toma Vertical 1



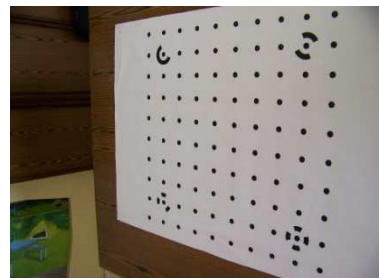
Cara 3- Toma Vertical 2



Cara 4. Toma Horizontal



Cara 4- Toma Vertical 1

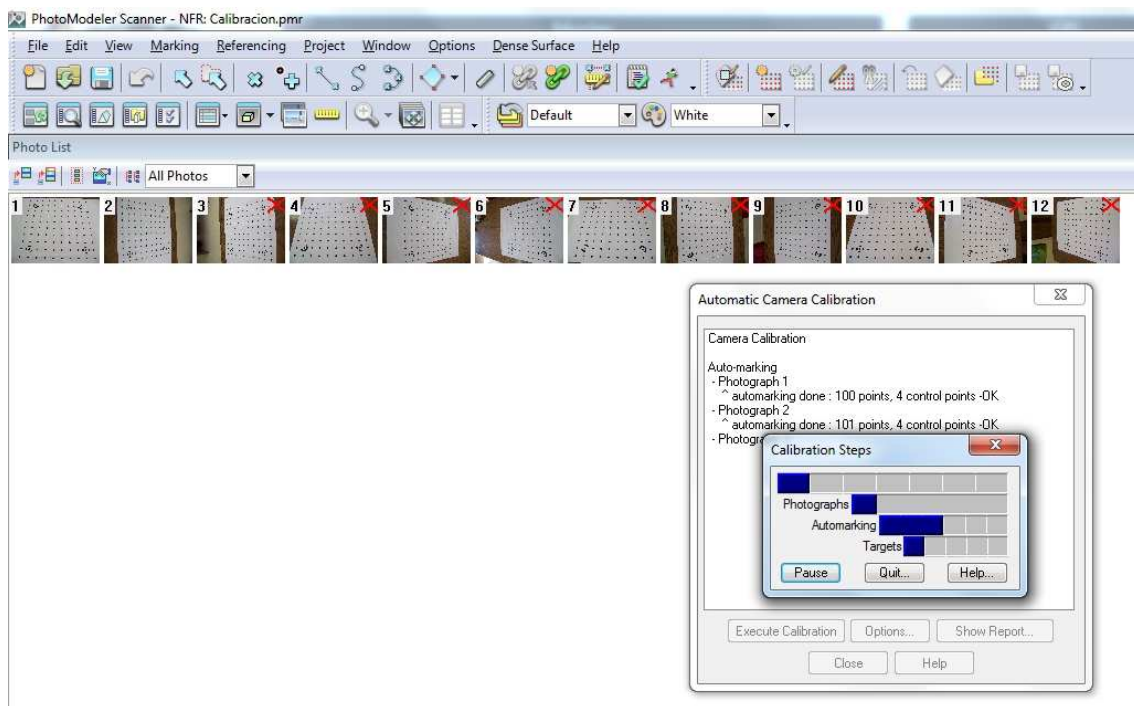


Cara 4- Toma Vertical 2

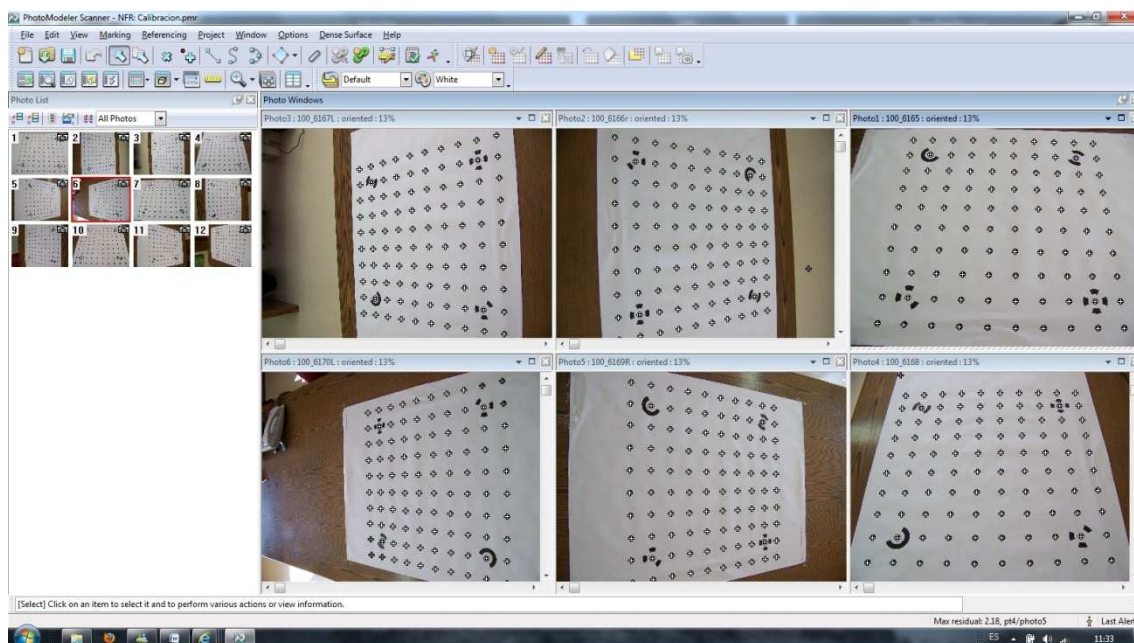
Proceso de Calibración

Cuando se ejecuta Photomodeler un asistente permite realizar un proceso de calibración. Esta ayuda facilita enormemente el proceso.

Se siguen los pasos del asistente y el software realiza las operaciones.



Los algoritmos del proceso reconocen las diferentes marcas que les permite realizar la calibración.



Finalmente se muestran los resultados que pueden ser exportados a un fichero de texto, tal como se muestra a continuación:

```
Status Report Tree

Project Name: Calibracion.pmr

Problems and Suggestions (1)
```

Project Problems (1)

Problem: A large percentage of your points are sub-pixel marked so it is assumed you are striving for a high accuracy result. The largest residual (Point4 - 2.18) is greater than 1.00 pixels.

Suggestion: In high accuracy projects, strive to get all point residuals under 1.00 pixels. If you have just a few high residual points, study them on each photo to ensure they are marked and referenced correctly. If many of your points have high residuals then make sure the camera stations are solving correctly. Ensure that you are using the best calibrated camera possible. Remove points that have been manually marked unless you need them.

Problems related to most recent processing (0)

Information from most recent processing

Last Processing Attempt: Sat Mar 03 11:40:43 2012

PhotoModeler Version: 6.3.3.794 - final,full

Status: successful

Processing Options

Orientation: off

Global Optimization: on

Calibration: on (full calibration)

Constraints: off

Total Error

Number of Processing Iterations: 2

Number of Processing Stages: 2

First Error: 2.814

Last Error: 2.814

Precisions / Standard Deviations

Camera Calibration Standard Deviations

Camera1: 3_KODAK Z712 IS ZOOM DIGITAL CAMERA [5.85]

Focal Length

Value: 6.162953 mm

Deviation: Focal: 9.3e-004 mm

Xp - principal point x

Value: 2.942477 mm

Deviation: Xp: 0.001 mm

Yp - principal point y

Value: 2.233436 mm

Deviation: Yp: 0.001 mm

Fw - format width

Value: 5.850773 mm

Deviation: Fw: 2.9e-004 mm

Fh - format height

Value: 4.387500 mm

K1 - radial distortion 1

Value: 7.133e-003

Deviation: K1: 3.6e-005

K2 - radial distortion 2

Value: -1.896e-004

Deviation: K2: 3.2e-006

K3 - radial distortion 3

Value: 0.000e+000

P1 - decentering distortion 1

Value: 1.168e-004

Deviation: P1: 6.9e-006

P2 - decentering distortion 2

Value: 2.568e-004

Deviation: P2: 7.1e-006


```
Quality
  Photographs
    Total Number: 12
    Bad Photos: 0
    Weak Photos: 0
    OK Photos: 12
    Number Oriented: 12
    Number with inverse camera flags set: 0
  Cameras
    Camera1: 3_KODAK Z712 IS ZOOM DIGITAL CAMERA [5.85]
      Calibration: yes
      Number of photos using camera: 12
      Average Photo Point Coverage: 86%
    Camera2: 2:KODAK Z712 IS ZOOM DIGITAL CAMERA [5.85]
      Calibration: yes
      Number of photos using camera: 0
      Average Photo Point Coverage: 86%
  Photo Coverage
    Number of referenced points outside of the Camera's calibrated coverage: 0
  Point Marking Residuals
    Overall RMS: 0.352 pixels
    Maximum: 2.183 pixels
      Point 4 on Photo 5
    Minimum: 0.201 pixels
      Point 72 on Photo 12
    Maximum RMS: 0.881 pixels
      Point 4
    Minimum RMS: 0.107 pixels
      Point 72
  Point Tightness
    Maximum: 0.0018 m
      Point 9
    Minimum: 0.00023 m
      Point 72
  Point Precisions
    Overall RMS Vector Length: 0.000121 m
    Maximum Vector Length: 0.000132 m
      Point 88
    Minimum Vector Length: 0.000118 m
      Point 29
    Maximum X: 6.51e-005 m
    Maximum Y: 6.54e-005 m
    Maximum Z: 9.62e-005 m
    Minimum X: 5.42e-005 m
    Minimum Y: 5.31e-005 m
    Minimum Z: 8.92e-005 m
```

CÁMARAS, CALIBRACIÓN Y SOFTWARE FOTOGRAMÉTRICO. CONCLUSIONES

AGISOFT PHOTOSCAN ha demostrado ser una herramienta muy potente, flexible y rápida en la obtención de resultados. Sus opciones son suficientes y es posible escalar el tiempo de cálculo en función de los resultados deseados.

Las principales dificultades derivan de la geometría de las tomas, condicionada por las propias obras de fábrica, los cauces y de la pérdida de detalle en tomas lejanas, en ocasiones obligada por la propia dimensión de la obra de fábrica.

Estos factores no pueden ser mejorados mediante opciones del software, generando dudas sobre la idoneidad de la cámara utilizada. Los problemas anteriormente referidos pueden contrarrestarse con objetivos con mayor campo (menor focal) y mayor grado de detalle, mayor resolución, de forma que pueda disminuirse el número de tomas a realizar y que la geometría de toma sea más favorable.

Por otro lado, una mayor resolución puede traducirse en problemas en el procesado por las limitaciones en la memoria.

Ante esta situación, se repite el proceso anteriormente descrito con PhotoScan con tomas realizadas con la cámara CANON, mejorando los resultados obtenidos y comprobándose que en condiciones idóneas basta con 3 tomas para alcanzar los objetivos deseados.

Por último y comparando las medidas obtenidas y los patrones de comparación se concluye que no es estrictamente necesario la calibración de las tomas, si bien es recomendable.

Resumiendo las conclusiones:

- Software aconsejado: PhotoScan
 - No es imprescindible la calibración de la cámara, para las precisiones requeridas en el presente trabajo. Basta con la autocalibración que realiza el software a partir del fichero EXIF.
 - Uso de máscaras en el proceso de alineación.
 - Tomas perpendiculares y espaciadas frente al objeto.
 - No es necesario reconstruir la geometría con gran calidad (*Medium*)
 - Se recomiendan más de 4 tomas por objeto. Un número mucho mayor de tomas no mejora los resultados.
- Cámara aconsejada (entre las opciones valoradas): CANON EOS550d
 - Tomas con focales en torno a 18mm. dan buen resultado y equilibrio entre distorsión y campo de imagen.
 - Mayor resolución posible.

MODELIZACIÓN HIDRÁULICA

Uno de los objetivos del presente trabajo es dotar de métodos que faciliten la caracterización geométrica de obras de fábrica y su incorporación en la modelización hidráulica. Otro objetivo es valorar las ventajas que en la modelización hidráulica aportan los modelos procedentes de nubes de puntos LIDAR y todo ello tratando que se realice de forma integrada en el menor número de paquetes de software posibles.

La mejora en los modelos y la mejor caracterización de las obras de fábrica nos permitirá determinar con mayor precisión las zonas inundables a partir de los estudios hidráulicos.

La modelización hidráulica es un proceso muy complejo donde intervienen gran cantidad de conocimiento fuera del alcance de los trabajos de este máster, si bien, resulta imprescindible tener ciertos conocimientos para poder tratar de dar respuesta a los objetivos planteados.

Se va a optar por modelos unidimensionales frente a modelos bidimensionales y los cálculos serán realizados en régimen permanente, ya que el régimen variable dota de mayor complejidad al modelo

En los siguientes apartados realizaré una breve introducción a las fases necesarias para realizar un análisis hidráulico, y del software elegido para realizar la modelización, en nuestro caso HEC-RAS y HEC-GeoRAS.

INTRODUCCIÓN A MODELOS HIDRÁULICOS UNIDIMENSIONALES

La elección de un modelo unidimensional supone un ahorro de tiempo considerable en la simulación. Sin embargo, como la modelización se realiza a partir de un conjunto de secciones de cálculo, se requiere una especial atención a la identificación de ciertos elementos que se deben obviar en la modelización.

El software elegido ha sido HEC-RAS, por ser uno de los modelos más utilizado y ser de libre distribución. Este se apoya en la herramienta de pre proceso y pos proceso HEC-GeoRAS para ArcGIS.

Ambos paquetes cuentan con las siguientes características:

- Tienen herramientas de pre proceso (definición de la geometría) y pos proceso compatibles con ArcGIS, permitiendo aproximar sobremanera las capacidades del GIS y de los datos LIDAR.
- Pueden calcular en régimen variable o permanente.
- Tiene capacidad de reproducir con fiabilidad un amplio abanico de situaciones que requieren condiciones especiales de contorno, así como la de incorporar las infraestructuras asociadas al cauce.

ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA ZONA DE ESTUDIO

En el análisis de la zona de estudio se deberán tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Observación de la extensión de las inundaciones en el pasado y de estudios existentes.
2. Observación de la geomorfología en planta. (sobre ortofoto y a partir del MDT)
3. Análisis de secciones transversales.

En nuestro caso obviaremos el paso 1 y nos centraremos en la información que nos permiten obtener los modelos a partir del MDT.

Junto a estos aspectos, hay ciertos elementos necesarios para la modelización y que deben ser identificados debidamente. Estos son:

- Zonas de ensanchamientos y estrechamientos bruscos del río.
- Zonas de cambios bruscos de pendiente.
- Zonas en las que el flujo no tienen capacidad de transporte en sentido longitudinal. (flujo no efectivo)

Otros elementos de importancia que deberán ser tenidos en cuenta son:

- Zonas de almacenamiento.
- Zonas encauzadas.
- Puentes y azudes.
- Diques longitudinales.

Es muy importante disponer de toda la información relativa la geometría de cada elemento, aspecto para el que este trabajo propone un método para la modelización de las obras de fábrica, con el fin de poder introducir adecuadamente los parámetros en el modelo.

Todos estos elementos mencionados producen unas pérdidas en la velocidad del flujo que se traduce en sobreelevaciones de la lámina de agua, dando lugar al aumento de la extensión de la zona de avenida y posibles aumentos de velocidad en zonas de aguas abajo.

Por otra parte, en toda la zona de estudio se deberán identificar, con carácter general:

- Los ejes y márgenes del río.
- Las líneas de flujo que van a definir la distancia a la que se encuentran las secciones en cada una de las márgenes inundables.
- Los polígonos de usos del suelo y de vegetación para definir la rugosidad del cauce.

Algunos de estos elementos físicos quedan bien representados por MDT mientras que otros tendrán que ser introducidos en el módulo de estudio hidráulico de forma manual.

CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO

Este es un punto fundamental dentro del presente trabajo, pues las metodologías presentadas pueden ayudar en la mejora de la geometría del modelo.

Distinguiremos dos fases:

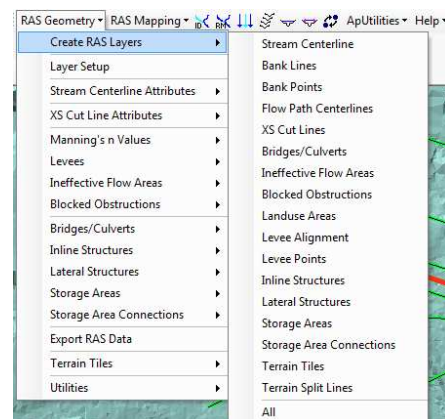
- Preparación de la geometría básica a partir de HEC-GeoRAS.
- Importación de la geometría básica a HEC-RAS, adición de elementos estructurales adicionales y creación de las geometrías necesarias para la modelización.

PREPARACIÓN DE LA GEOMETRÍA BÁSICA EN HEC-GEORAS

Es recomendable, al menos, definir los siguiente elementos geométricos:

- Identificación del eje del río (Stream Centerline).
- Identificación de los márgenes del río (Bank Lines).
- Definición de las secciones (XS Cut Lines).
- Definición de la líneas de flujo central y lateral (Flow Path Centerlines)
- Identificación de puentes y obras de fábrica (Bridges/Culvert)

Una vez instalada la aplicación, sobre ArcGIS activamos la barra de herramientas. Siguiendo un proceso lógico definimos cada uno de los elementos geométricos considerados.

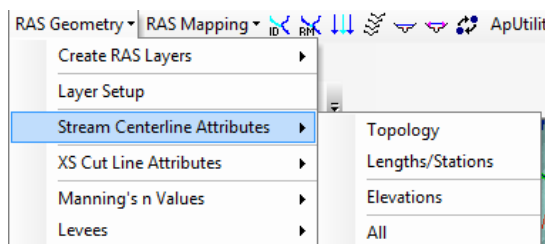


En primer lugar necesitamos de un MDT, bien, en formato RASTER o bien un TIN, que servirá de base altimétrica.

A partir del comando *Create RAS Layers* se selecciona la capa que se desea crear. Se añade la capa a tabla de contenidos de ArcGIS y se realiza la edición.

Una vez digitalizadas las capas, es necesario completar los campos de la tabla de atributos. Siguiendo de forma lógica las opciones de la tabla de herramienta, se va recorriendo de arriba abajo, ayudándonos de los menús desplegables y ejecutando las opciones de arriba abajo nuevamente.

Las diferentes opciones van rellenando los valores



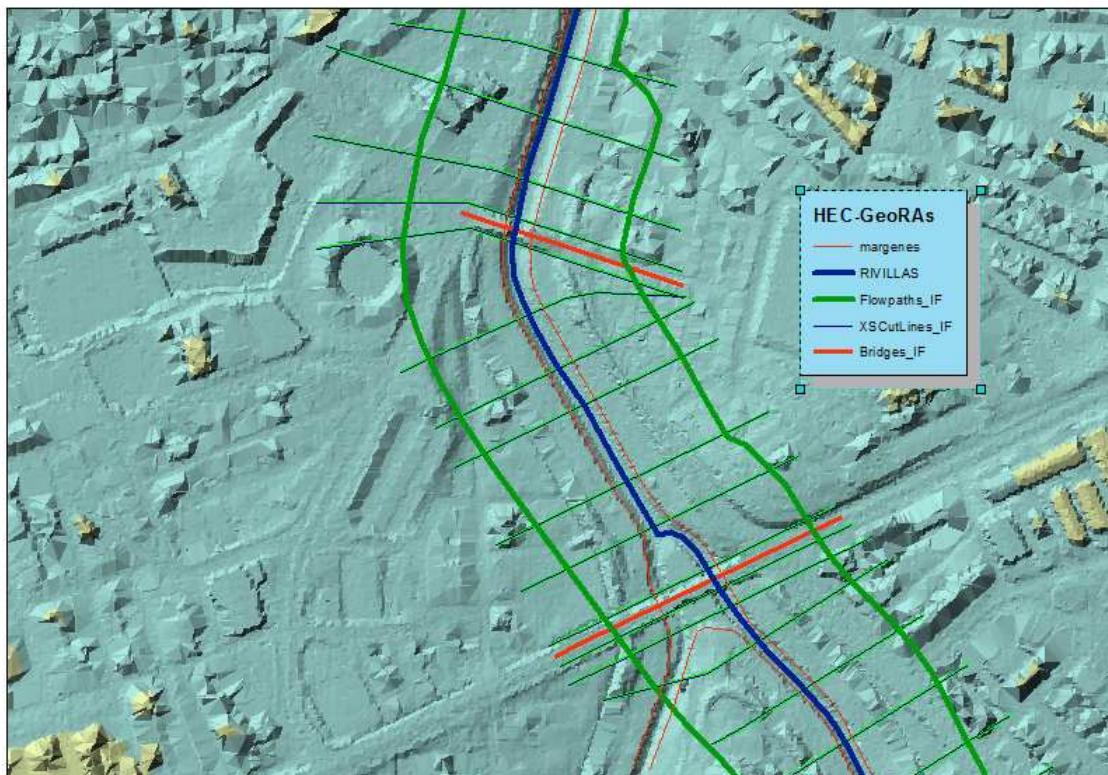
de la tabla de atributos.

Table											
River											
Shape *	OID *	Shape_Len	HydroID	River	Reach	FromNode	ToNode	ArcLength	FromSta	ToSta	
Polyline	1348	1740,47136	12303	RivCala	Encauzado	1	2	1740,471	0	1740,471	
Polyline	1349	26753,5021	12304	Calamon	No Encauzad	3	4	26753,5	1719,1	28472,6	
Polyline	1350	35349,1403	12305	Rivillas	No Encauzad	5	6	35349,14	1018,226	36367,37	
Polyline	1351	1719,10043	12306	Calamon	Encauzado	4	1	1719,1	0	1719,1	
Polyline	1352	1018,22611	12307	Rivillas	Encauzado	6	1	1018,226	0	1018,226	

Continuaremos los mismos pasos con el resto de elementos geométricos para proceder por último a la exportación.

1. Identificación del eje de los ríos. Definición de tramos.

Se digitaliza la línea del eje del río a partir del TIN del MDE procedente del LIDAR y de la ortofoto, dando preferencia a la geometría definida por el TIN LIDAR.

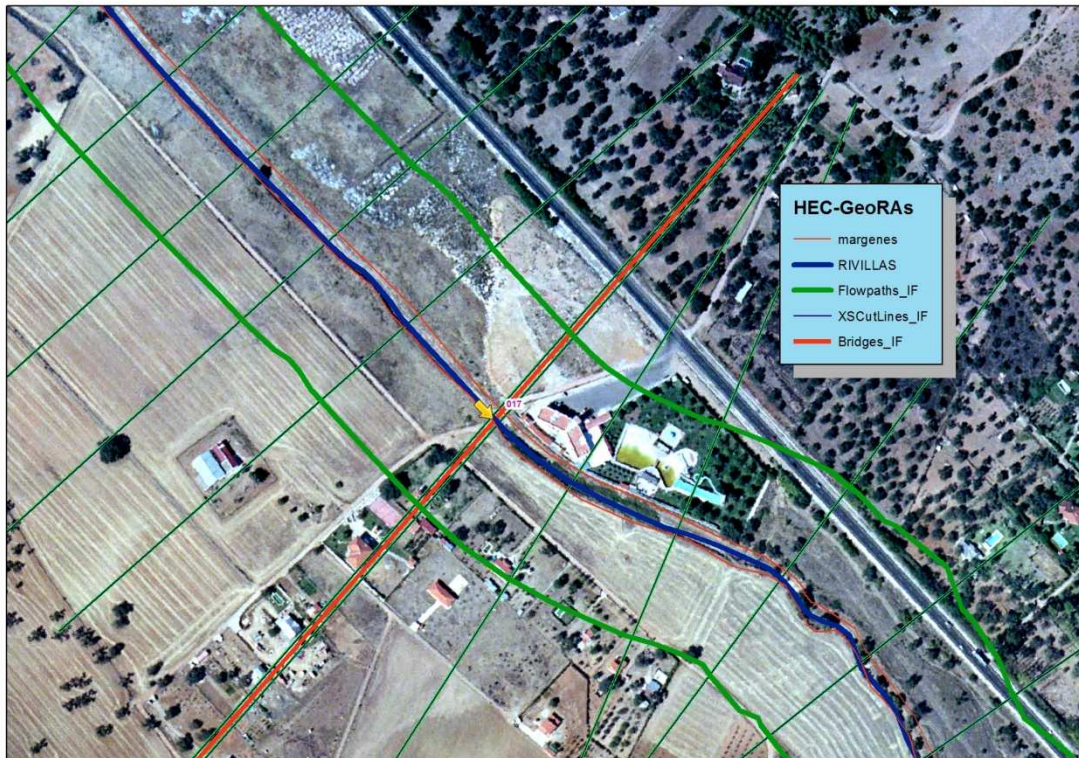
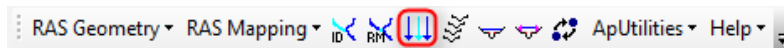


2. Identificación de la márgenes del río.

Al igual que con el cauce se digitalizan las márgenes a partir de la interpretación del MDT y de la Ortofotografía.

3. Identificación de las líneas de flujo laterales.

Se escoge una distancia media para la zona inundable. Se estima esta en 100m. y se genera a partir de una paralela al cauce principal. En la aplicación hay que definir si está a la derecha o izquierda del cauce.



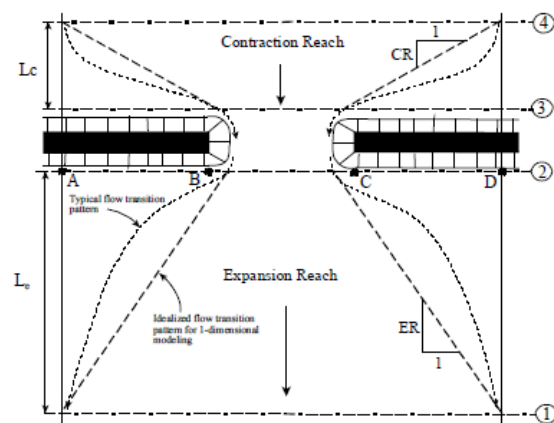
4. Incorporación de puentes y obras de fábrica.

El efecto de obstrucción que provoca un puente u obra de fábrica produce una elevación de la lámina aguas arriba del puente de modo que aumenta la inundabilidad en determinadas zonas. De igual forma, puede suceder, que los niveles aguas abajo sean inferiores, provocando una disminución de la inundabilidad pero provocando un incremento de la velocidad del flujo, provocando procesos erosivos y de arrastre de materiales.

La incorporación de puentes en el modelo requiere la definición de, al menos, cuatro secciones transversales, con el objeto de que el entorno del puente quede bien representado. Para ellos las secciones deben estar dispuestas de tal forma que abarque las extensiones aproximadas aguas arriba y aguas abajo del puente en la que se producen los fenómenos de contracción y expansión del flujo.

La situación ideal para la generación de las secciones sería contar con dos secciones lo más próximas posibles al puente u obra de fábrica, y otras dos, una aguas arriba y otra aguas abajo que coincidiera con los límites de la influencia producida en el cauce por el proceso de contracción y expansión.

Es necesario conocer la distancia de la sección ③ al inicio de la obra de fábrica, pues esta es necesaria para definirla en HEC-RAS. Por tanto debemos poner especial cuidado la posición de



estos perfiles.

También es importante tratar de tener un perfil cercano pero con la menor vegetación posible. El efecto de la vegetación sobre el LIDAR es un fenómeno que debe ser considerado. Procuraremos establecer secciones en zonas de poca vegetación.

5. Distancia entre secciones transversales al cauce.

La distancia a la que se introducen las secciones debe ser tal que se produzca el flujo unidimensional en el río. Se pueden tener en cuenta los siguientes criterios en el momento de escoger la distancia entre secciones:

$$\Delta x < 20B \qquad x < \frac{1}{2S} \qquad \Delta x < 0,2 \frac{h}{S}$$

Donde:

- Δx es la distancia entre secciones en metros
- B es el ancho mojado de la sección en metros.
- h es el calado en metros
- S es la pendiente del tramo (m/m .)

Deben ser perpendiculares a las líneas de flujo, pudiendo ser quebradas, de forma que pueda verificarse entre secciones la condición de flujo unidimensional. Se colocarán secciones en zonas de cambio de geometría en planta. Para los tramos encauzados se colocará una sección al inicio y otra al final, al igual, que se realizará con los puentes y obras de fábrica, de forma que queden definidos la zona de contracción y expansión que permitan definir la zonas de flujo inefectivo.

Según la bibliografía consultada la distancia mínima entre secciones nunca debe ser superior a los 100m, cuando se pretende obtener una geometría básica.

Sin embargo, la alta resolución del MDT utilizado permite trabajar con una resolución mayor que compensará el tiempo en la definición más detallada de la geometría con las posibles dudas que puedan surgir en el proceso de modelización.

También contribuye en la decisión de utilizar esquemas más detallados el hecho de la necesidad de definir un campo de velocidades lo más detallado posible para la identificación de la zona de flujo preferente.

El MDT es la mayor fuente de error en la modelización hidráulica debido a errores en la obtención de calados y las zonas de inundación, a partir de los caudales. Una topografía detallada de la zona de estudio redundará en una modelización más precisa.

La posibilidad de acceder a modelos procedentes de datos LIDAR y la propia naturaleza de este trabajo en el que se procura establecer una metodología que ayude en la modelización hidráulica a partir de una mejor definición geométrica de las obras de fábrica, hace que requiramos una resolución media-alta en el modelo.

Es muy importante prestar especial cuidado en esta fase, pues las modificaciones posteriores deberán realizarse, en gran medida, sobre el propio HEC-RAS, lo cual resulta considerablemente más difícil

6. Identificación de las zonas de flujo no efectivo.

Estas zonas se caracterizan por no contribuir al transporte del agua. Se dan dos situaciones:

- Aguas arriba de un estrechamiento, con lo que se reduce la capacidad de transporte de las secciones próximas al área afectada por el elemento que origina la contracción.
- En una expansión brusca, en el que el flujo deja de funcionar de manera unidimensional. En este caso el elemento que genera la contracción genera un efecto de sombra aguas abajo, que se traduce en una reducción de la capacidad de transporte al expandirse el flujo unidimensional.

En ambos casos estas zonas contribuyen a la elevación de la lámina de agua.

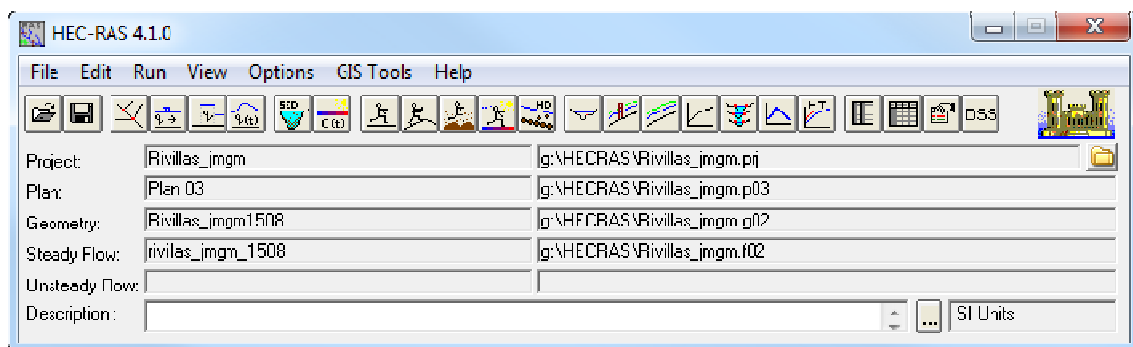
En el presente trabajo se modelizarán las obras de fábrica sobre HEC-RAS y sobre estas las áreas de flujo inefectivo.

IMPORTACIÓN DE LA GEOMETRÍA BÁSICA A HEC-RAS. ADICIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES ADICIONALES.

Una vez creada con éxito la geometría desde HEC-GeoRAS procedemos a su importación en HEC-RAS.

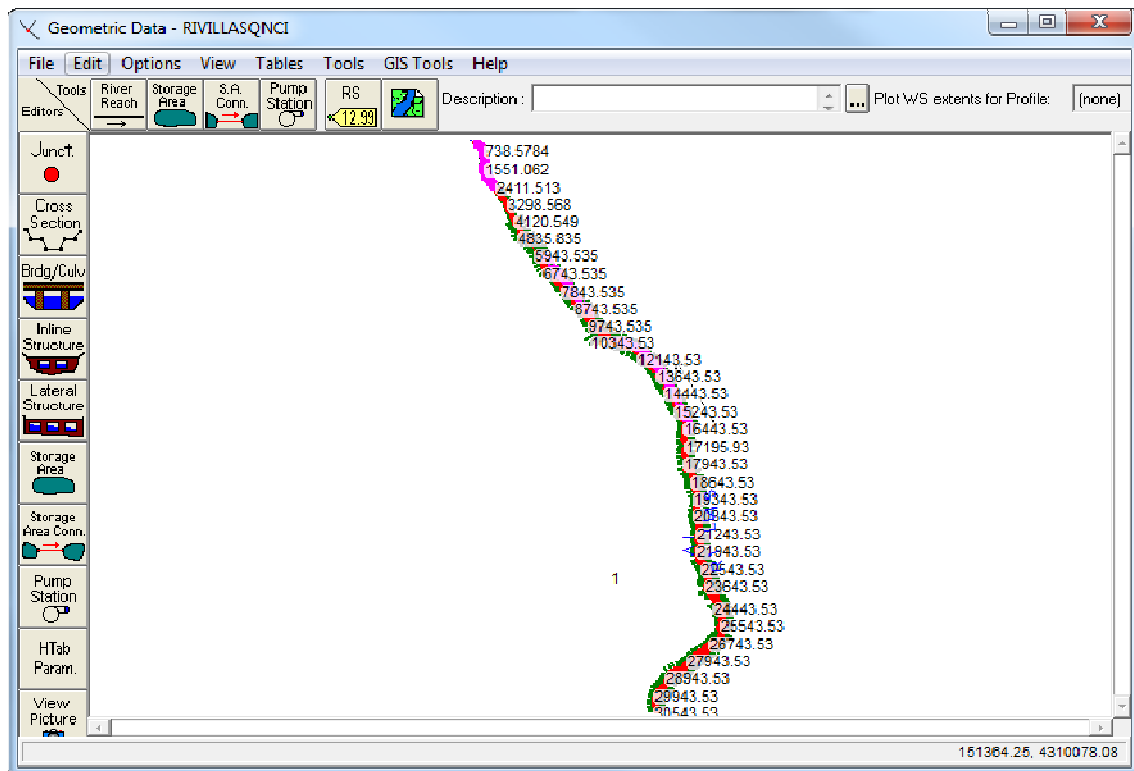
Sucintamente, definimos los pasos para realizar una modelización en HEC-RAS, una vez instalado el programa.

En primer lugar deberemos cambiar la configuración de nuestro equipo de forma que trabaja con el punto como separador decimal. Se recomienda cambiar la configuración regional del equipo a configuración *Inglés (Estados Unidos)*.



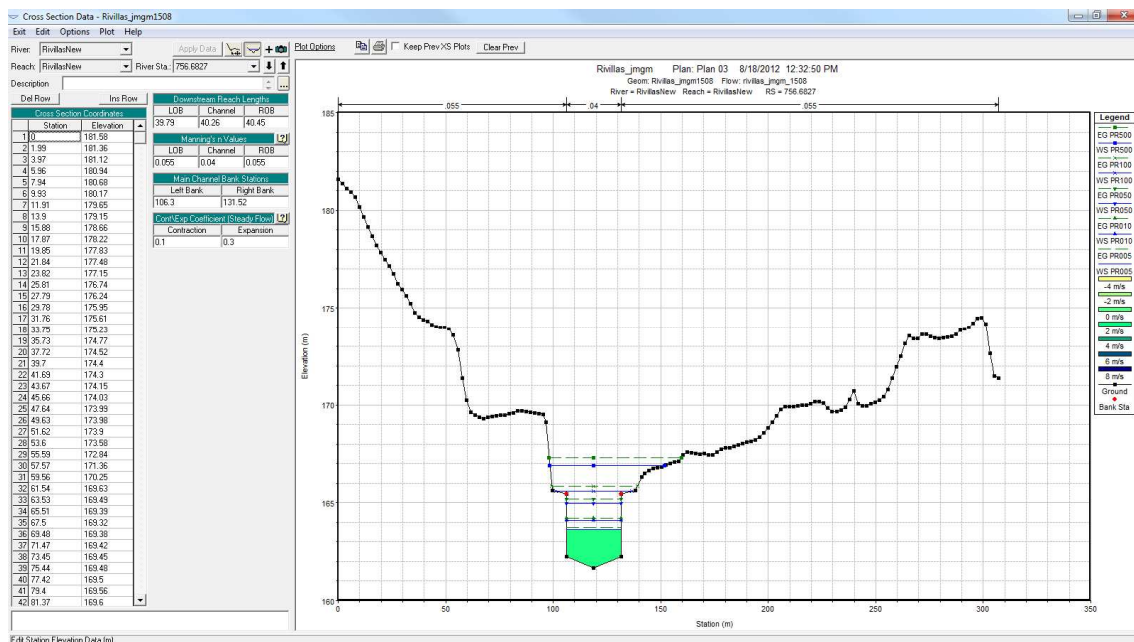
1. Creamos un proyecto nuevo, por ejemplo: Rivillas_jmgm
2. Introducimos los datos geométricos exportados desde HEC Geo-RAS

Si la importación se ha realizado correctamente podremos ver una pantalla con la definición de la geometría.



En ellas se observan los diferentes elementos geométricos definidos anteriormente.

3. Conviene revisar los perfiles transversales uno por uno, de forma que no se presenten errores.



En el caso de que se existan zonas encauzadas con una sección definida se corregirá el perfil de acuerdo a los datos de la sección.

4. Ajuste de los puntos de margen

Debido a que los márgenes se dibujan sobre el MDT con ayuda de la ortofoto, conviene revisar la situación de estos en los perfiles, debiéndose consultar sobre el GIS en aquellas ocasiones que se presente alguna duda.

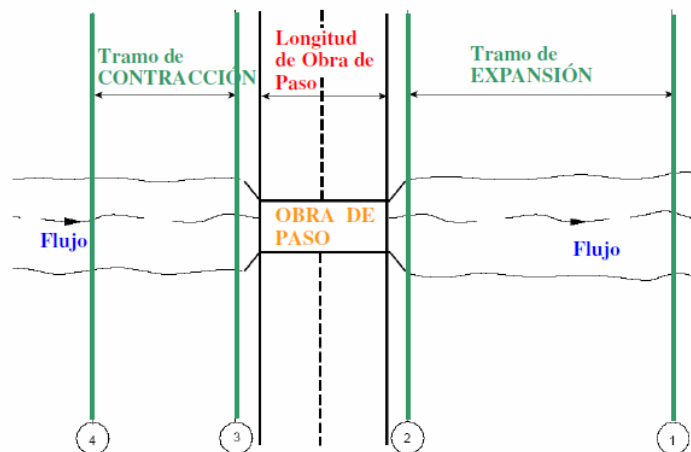
5. Definición de Puentes (Bridges) y Obras de fábrica (Culvert)

En primer lugar llevaremos a cabo una comprobación de la existencia de perfiles de referencia aguas arriba y aguas abajo de los bridges y culvert. Se recorre cada uno de las obras de fábrica y se comprueba la existencia de los perfiles y que la distancia entre estos sea coherente con la dada en el GIS.

Para definir las obras de fábrica tendremos dos opciones en función de si se trata de puentes apoyado en pilas u obras de fábrica.

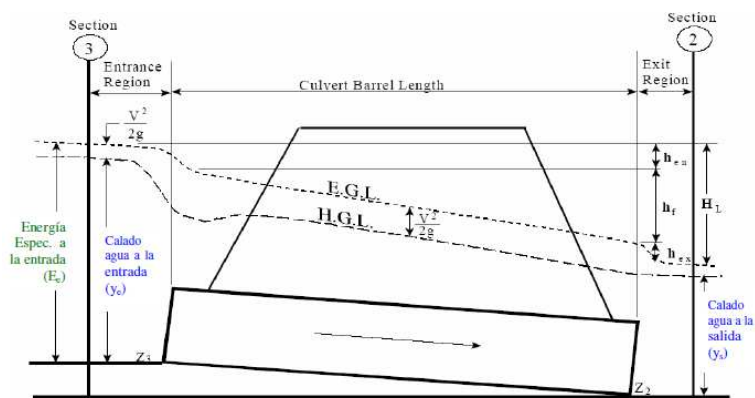
Si bien hemos realizado una pequeña introducción en el apartado dedicado a la definición de la geometría del cauce con HEC-GeORAS ampliaremos esta información con el proceso de modelización de los puentes y obras de fábrica en HEC-RAS.

Como hemos comentado cuatro son las secciones necesarias para una correcta simulación. En la siguiente figura. Las secciones ④ y ① son responsables de aportar información sobre condiciones de contorno que HEC-RAS utilizará en los cálculos hidráulicos de la obra de paso. Es muy recomendable el uso de áreas inefectivas en estos tramos para simular los fenómenos de contracción y expansión.



Las secciones ② y ③ deben ser trazadas lo más cercanas posibles a la obra de paso, de forma que tengamos la mejor geometría de entrada y salida. Para las secciones ① y ④ se recomienda que tengan la suficiente distancia a la obra de paso para que no sea afectado por los fenómenos de contracción y expansión.

En el esquema de cálculo hidráulico que sigue HEC-RAS son las secciones ② y ③ las que contienen las variables hidráulicas de contorno. Entre estas dos geometrías y con la información sobre la tipología de obra de fábrica que introducimos, HEC-RAS genera las secciones internas de balance de energía. En la siguiente figura se presenta una definición de las variables hidráulicas y la línea de energía (EGL), con las pérdidas correspondientes.

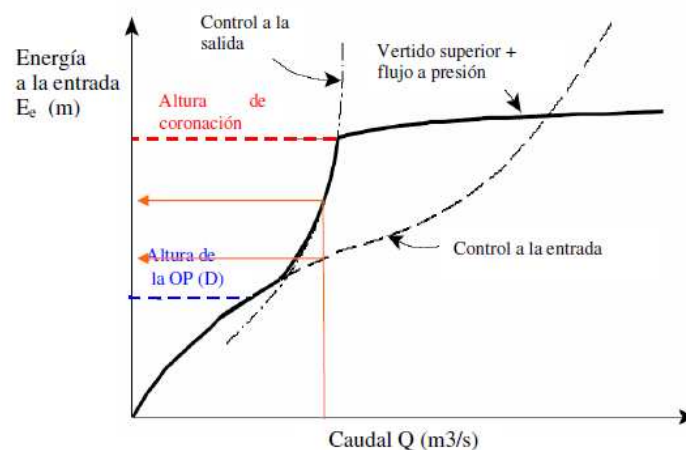


Debemos destacar como variables de contorno el calado de agua a la entrada (y_e), Energía Específica a la entrada (E_e) y calado de agua a la salida (y_s). Para la determinación de la solución correcta, HEC-RAS

estudia los diferentes tipos de flujo posibles, aplicando una formulación específica para cada uno de ellos, y finalmente, realiza una comparación de resultados según un criterio de decisión basado en la Energía Específica a la entrada (E_e). Definimos de modo general 3 tipos de flujo posibles (funcionamiento hidráulico de la OP):

- (1) Control en la entrada
- (2) Control en la salida
- (3) Flujo a presión con vertido superior.

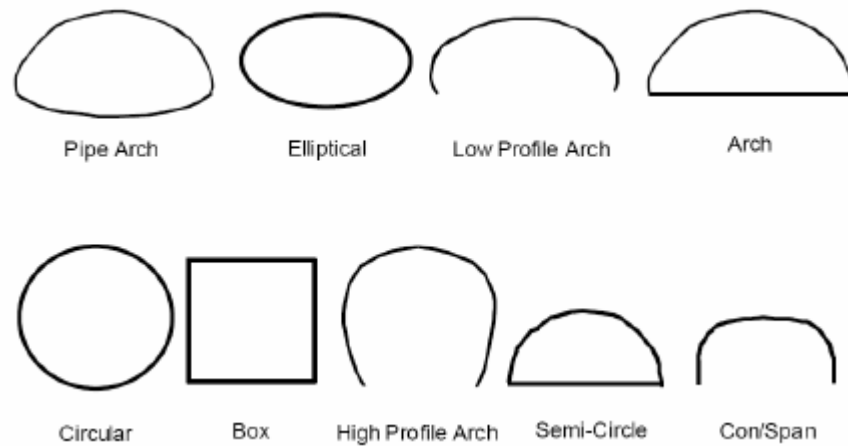
Básicamente el procedimiento de cálculo consiste en la determinación de las soluciones (1) y (2), de modo que cada una de ellas define un valor de energía a la entrada E_e . El criterio de decisión es el de máxima energía, y en consecuencia se adopta como solución válida aquella que ofrece un mayor valor de energía E_e . En la siguiente figura se muestra un gráfico en el que, en función del caudal de estudio, se determina el valor de E_e para el flujo de Control a la entrada (1) y Control a la salida (2). Es el mayor de ambos el que se adopta como válido. Este criterio va más allá en el caso que la energía E_e supere la altura de la cresta o coronación de la vía, con lo cual el tipo de flujo resultante adoptado es el (3) flujo a presión con vertido superior y se aplica su formulación particular.



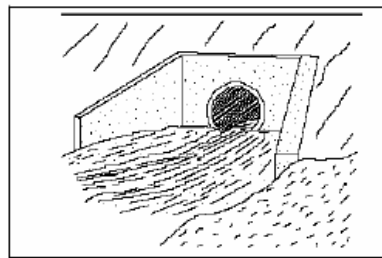
El programa HEC-RAS ofrece una amplia gama de posibilidades y geometrías para la obra de paso. Todas ellas son obtenidas de las publicaciones técnicas del FHWA (Federal Highway Administration), y su clasificación y nomenclatura se ciñe a ellas. En función de la clasificación se asignan los distintos parámetros empíricos de la formulación de control a la entrada, anteriormente presentados. Se distinguen tres aspectos relacionados con la OP:

- Shape (Forma): Se pueden escoger 8 tipos distintos de sección (circular, cajón, elíptica, arco...).
- Chart Number: En función de la forma, se escoge el tipo de material en que está ejecutada la OP.
- Scale Number: Los distintos tipos de obra de entrada (aletas, remates, paramentos...) hacia la OP.

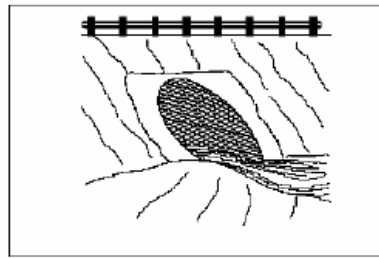
La siguiente figura muestra las formas que son elegibles en HEC-RAS.



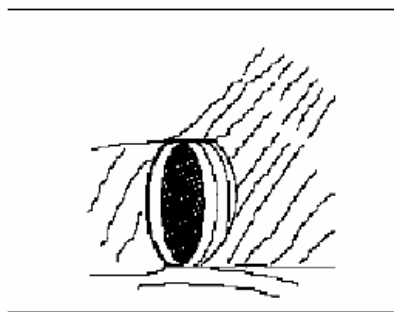
La presente figura muestra algunos ejemplos sobre tipos de obra de entrada (Scale Number) para diferentes formas, según publicaciones de la FHWA.



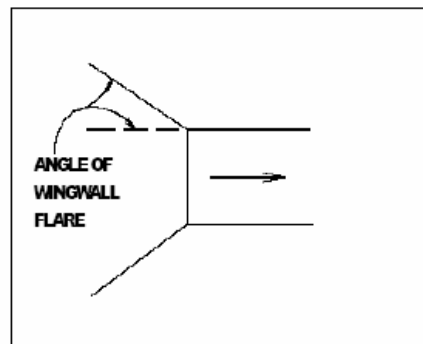
Culvert Inlet with Headwall and Wingwalls



Culvert Inlet Mitered to Conform to Slope



Culvert Inlet Projecting from Fill



Flared Wingwalls (Chart 8)

En cualquier caso se recomienda tener siempre presente la documentación generada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers):

- Applications Guide.
- Hydraulic Reference Manual
- User's Manual

Asimismo, la elección de las pérdidas locales de energía viene condicionada por la tipología de obras de transición. Una serie de tablas descriptivas son consultables directamente en HEC-RAS, o se deben consultar en la documentación.

El valor de los coeficientes de rugosidad de Manning para cada uno de los materiales de recubrimiento interior de la OP también puede ser consultado en la documentación o en el propio HEC-RAS. En la siguiente tabla, extraída del “Hydraulic Reference Manual”, aparecen valores máximos, mínimos y medios de los números de Manning (n) de distintos materiales.

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
Brass, smooth:	0.009	0.010	0.013
Steel:			
Lockbar and welded	0.010	0.012	0.014
Riveted and spiral	0.013	0.016	0.017
Cast Iron:			
Coated	0.010	0.013	0.014
Uncoated	0.011	0.014	0.016
Wrought Iron:			
Black	0.012	0.014	0.015
Galvanized	0.013	0.016	0.017
Corrugated Metal:			
Subdrain	0.017	0.019	0.021
Storm Drain	0.021	0.024	0.030
Lucite:	0.008	0.009	0.010
Glass:	0.009	0.010	0.013
Cement:			
Neat, surface	0.010	0.011	0.013
Mortar	0.011	0.013	0.015
Concrete:			
Culvert, straight and free of debris	0.010	0.011	0.013
Culvert with bends, connections, and some debris	0.011	0.013	0.014
Finished	0.011	0.012	0.014
Sewer with manholes, inlet, etc., straight	0.013	0.015	0.017
Unfinished, steel form	0.012	0.013	0.014
Unfinished, smooth wood form	0.012	0.014	0.016
Unfinished, rough wood form	0.015	0.017	0.020
Wood:			
Stave	0.010	0.012	0.014
Laminated, treated	0.015	0.017	0.020
Clay:			
Common drainage tile	0.011	0.013	0.017
Vitrified sewer	0.011	0.014	0.017
Vitrified sewer with manholes, inlet, etc.	0.013	0.015	0.017
Vitrified Subdrain with open joint	0.014	0.016	0.018
Brickwork:			
Glazed	0.011	0.013	0.015
Lined with cement mortar	0.012	0.015	0.017
Sanitary sewers coated with sewage slime with bends and connections	0.012	0.013	0.016
Paved invert, sewer, smooth bottom	0.016	0.019	0.020
Rubble masonry, cemented	0.018	0.025	0.030

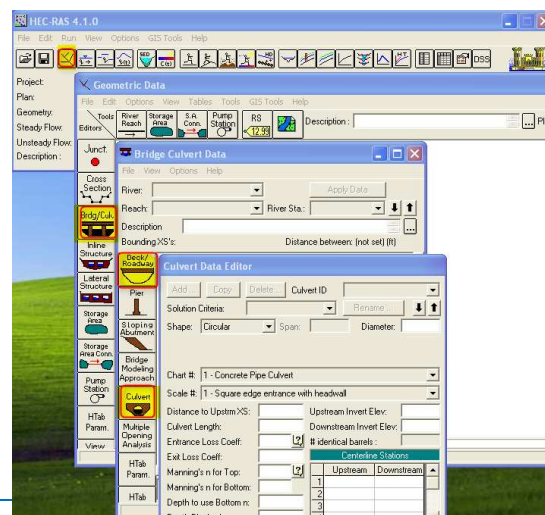
[Chow, 1959]

Una vez tenemos la información de partida necesaria, procedemos a definir las obras de paso en HEC-RAS.

Desde el editor de geometría, accedemos a Bridges/Culvert y desde este último a Deck/Roadway y a Culvert.

Deck/Roadway: Debemos introducir:

- *Distancie*: distancia desde la cara de aguas arriba del puente hasta la sección
- ③ aguas arriba del culvert



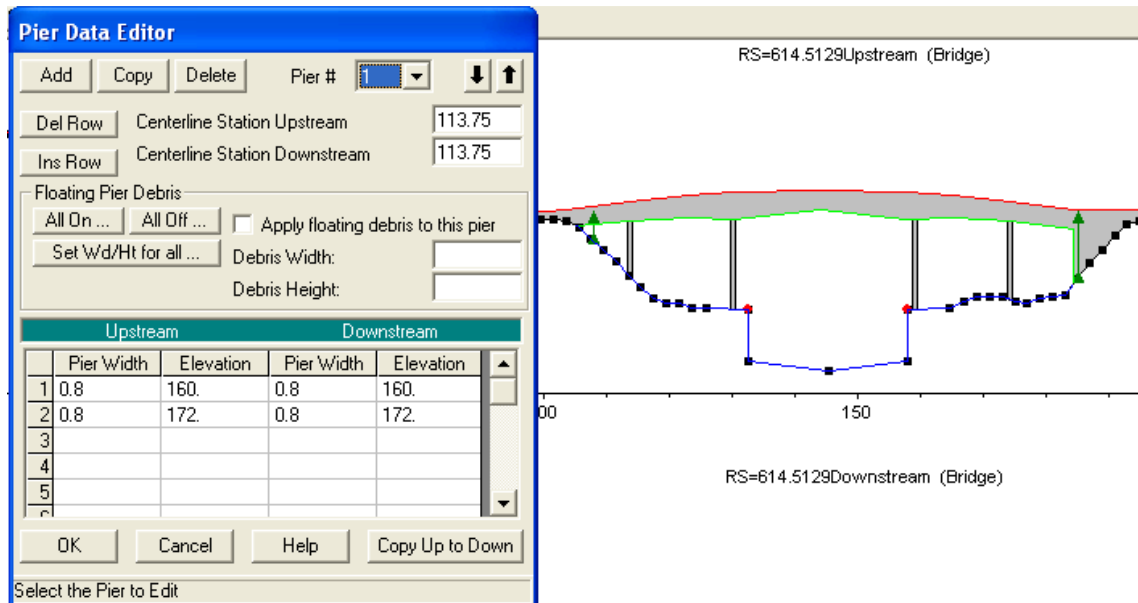
- *Width*: ancho del tablero en metros
- *Weir coef*: coeficiente de vertedero que se usará para el cálculo del flujo por encima (por defecto 1.44)
- *Cotas superiores (high chord) e inferiores (low chord) del tablero a diferentes abscisas (Station)*. Si estos datos son iguales aguas arriba y aguas abajo del puente. pueden copiarse seleccionando el icono "Copy US to DS".
- *U.S. Embankment*: inclinación del talud de aguas arriba de la carretera en relación H:V
- *D.S. Embankment*: inclinación del talud de aguas abajo de la carretera

Las características de la, tuberías, cajones, arcos, etc., se introducen en la ventana "Bridge Culvert Data", icono "Culvert". Debemos introducir:

- *Shape*: forma. a elegir entre 9 formas estándar.
- *Span*: ancho .
- *Diam*: diámetro.
- *Chart #*: Tipo de material. Para cada uno de las formas el programa da a elegir en diferentes tipo de materiales. Según normas de la FHWA
- *Scale #*: Distintos tipo de obra de entrada al culvert, según documentación de la FHWA.
- *Distance tu Upstrm XS*: Distancia a la sección transversal de aguas arriba.
- *Culvert Length*: Longitud de las tuberías.
- *Entrance Loss Coeff*: coeficiente de pérdida de carga a la entrada.
- *Exit Loss Coeff*: coeficiente de pérdida de carga a la salida.
- *Manning's n for Top*: coeficiente de Manning para la parte de arriba de la tubería.
- *Manning's n for Bottom*: coeficiente de Manning para la parte de abajo de la tubería.
- *Depth to use Bottom n*: calado a partir del cual se usa el coeficiente de Manning de abajo.
- *Depth Blocked*: calado inefectivo por acumulación de sedimentos o relleno.
- *Upstream Invert Elev*: cota de la zona baja de la estructura de aguas arriba
- *Downstream Invert Elev*: cota de la zona baja de la estructura aguas abajo
- *Centerline Stations*: abscisas de los ejes de las tuberías, aguas arriba (upstream) y aguas abajo (downstream)

Los números de Manning para los diferentes materiales y los coeficientes de pérdida de carga por la geometría de la obra pueden consultarse en el capítulo 6 del "Reference Manual".

Para la creación de puentes seguiremos los mismos pasos, definiendo el tablero y las pilas de apoyo, “Pier” en la ventana de edición de “Bridge Culvert Data”. Se define cada una de las características de las pilas y su situación tanto aguas arriba como aguas abajo

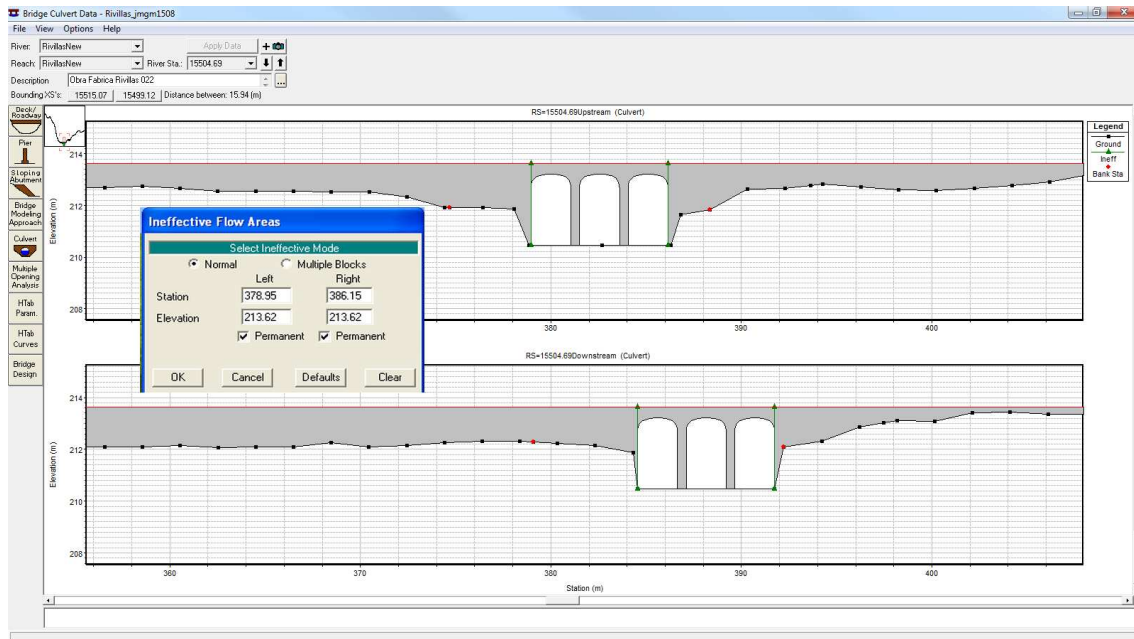


Los parámetros a introducir son:

- Pier#: número de la pila, siempre comenzando por 1. Permite copiar y borrar cada pila.
- Centerline Station Upstream: abscisa del eje de la pila aguas arriba
- Centerline Station Downstream: abscisa del eje de la pila aguas abajo
- Pier Width: Ancho de la pila.
- Elevation: Cota de la pila con el ancho indicado.

6. Definición de las zonas de flujo no eficiente.

Como hemos mencionado anteriormente las zonas de flujo no eficiente se caracterizan por no contribuir en la evacuación del agua, presentando campos de velocidades casi nulos. Estas zonas se definen en los límites de la apertura del culvert dentro de la obra de paso. En la siguiente figura se puede ver un ejemplo.



En el gráfico quedan definidos por unas flechas verdes. Se introducen las zonas laterales y la elevación máxima de la estructura.

La bibliografía recomienda un ángulo de 45° en la zona de contracción y de unos 30° en la zona de expansión.

Estos se determinan mediante la inclusión de un coeficiente que puede ser consultado en la documentación.

CAUDALES Y CONDICIONES DE CONTORNO

En la ventana principal de HEC-RAS accedemos a *menú* → *Edit* → *Steady Flow Data* o directamente sobre

el botón

En primer lugar hay que indicar el número de “perfiles” (Profiles) que hay que calcular. Con “perfiles” se refiere a diversas hipótesis de cálculo que deseamos plantear simultáneamente, para varios caudales. Es necesario al menos un dato de caudal para cada tramo y cada perfil.

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates				
River	Reach	RS	PR005	PR010	PR050	PR100	PR500
1 RivillasNew	RivillasNew	31236.01	15	22	40	55	99
2 RivillasNew	RivillasNew	9850.527	29	43	77	105	187
3 RivillasNew	RivillasNew	3005.07E	37	54	97	133	236
4 RivillasNew	RivillasNew	2006.32E	56	84	154	213	384

En nuestro caso, hemos indicado 4 perfiles para los periodos de retorno de 5, 10, 50, 100 y 500 años. Se han definido diferentes localizaciones para tener en cuenta las aportaciones de los diferentes afluentes.

Para cada uno de los perfiles introducimos un dato de caudal (en m3/s). Los datos de caudal se introducen comenzando aguas arriba para cada tramo. Cuando se introduce un caudal en el extremo superior (aguas arriba), el programa supone el mismo caudal para el resto de secciones dentro de ese tramo del río, aunque pueden cambiarse en cada sección.

En la misma ventana en que introducimos los datos de caudales es necesario especificar las condiciones de contorno (Boundary conditions), pulsando sobre el botón *Reach Boundary Conditions*, apareciendo la siguiente ventana:

River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
RivillasNew	RivillasNew	all	Critical Depth	Normal Depth S = 0.001

HEC-RAS necesita esta información en cada tramo para establecer el nivel del agua inicial en ambos extremos del tramo del río: aguas arriba y/o aguas abajo. En un régimen subcrítico (flujo lento) sólo se necesita en el extremo de aguas abajo (downstream); en régimen supercrítico (flujo rápido), sólo es necesario aguas arriba (upstream), y si se va a calcular en un régimen mixto (por variaciones del caudal), se necesitaría en ambos extremos del tramo.

Estas condiciones de contorno pueden valer para todos los perfiles o bien, podemos desear indicarlo específicamente para cada perfil, en la opción *Set boundary for one profile at a time* (Indicar las condiciones de contorno para cada perfil).

Existen cuatro posibilidades (ver los botones de la figura de arriba):

- *Alturas de la superficie del agua conocidas (Known Water Surface Elevations)*. El usuario debe introducir la altura del agua para cada uno de los perfiles que se van a calcular
- *Profundidad crítica (Critical Depth)*. Con esta opción, el usuario no tiene que introducir nada. El programa calcula la profundidad crítica para cada uno de los perfiles y la utilizará como condición de contorno.
- *Profundidad Normal (Normal Depth)*. En este caso, el usuario debe introducir el pendiente de la línea de energía (energy slope) que se utilizará para calcular la profundidad normal en ese punto (ecuación de Manning). Si no se conoce ese dato, se puede sustituir por la pendiente del agua o la pendiente del fondo del cauce.
- *Curva de gastos (Rating Curve)*. En esta opción debemos introducir una serie de parejas de valores nivel-caudal

Para la obtención de caudales se ha utilizado los datos procedentes de la aplicación CAUMAX elaborada por el CEDEX

CAUMAX

Dentro del ámbito del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, encargó al CEDEX mediante un Convenio de colaboración la elaboración de un mapa de los caudales máximos asociados a distintas probabilidades de recurrencia en la red de ríos que gestiona a través de las distintas Confederaciones Hidrográficas.


Este trabajo se presenta en la aplicación CAUMAX, integrada en un sistema de información geográfica, en la que es posible consultar los caudales máximos instantáneos en régimen natural asociados a distintos periodos de retorno para los cauces con una cuenca superior a 50 km² y calcular estos caudales mediante el método racional modificado para cauces con cuencas inferiores a 50 km². Se puede consultar la memoria técnica que explica el proceso de realización de estos trabajos.

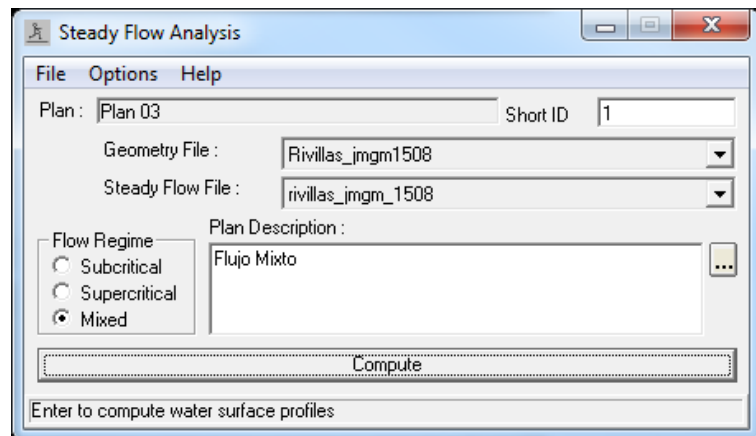
Los mapas en cauces con cuencas superiores a 50 km² se pueden consultar también en el visor del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.

Los resultados de este trabajo son una referencia inicial de los caudales de avenidas existentes, que en cada caso podrán ser completados a partir de estudios específicos y más detallados, pudiendo ser este trabajo la base para realizar los estudios necesarios en:

- Expedientes de autorizaciones en DPH y zona de policía.
- Dimensionamiento de obras transversales de drenaje.
- Estudios de determinación de zonas inundables.
- Delimitación aproximada del dominio público hidráulico.

EJECUCIÓN DEL MODELO

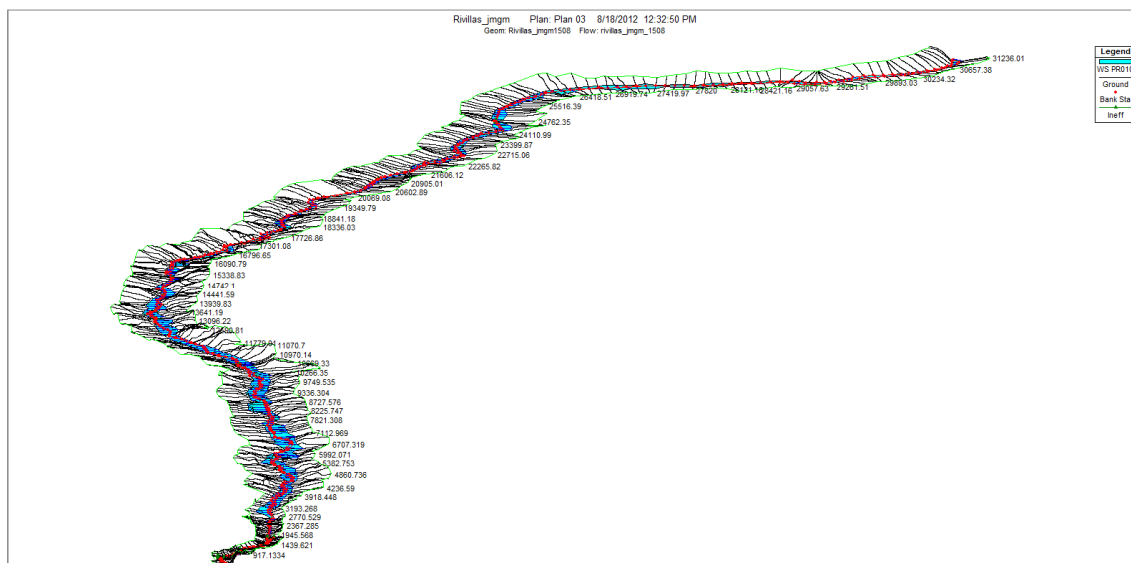
Pulsando en  o en la ventana principal de HEC-RAS, *menú* → *Run* → *Steady Flow Analysis...* (ya que en este caso hemos utilizado un caudal constante (Steady)). Aparece la correspondiente ventana

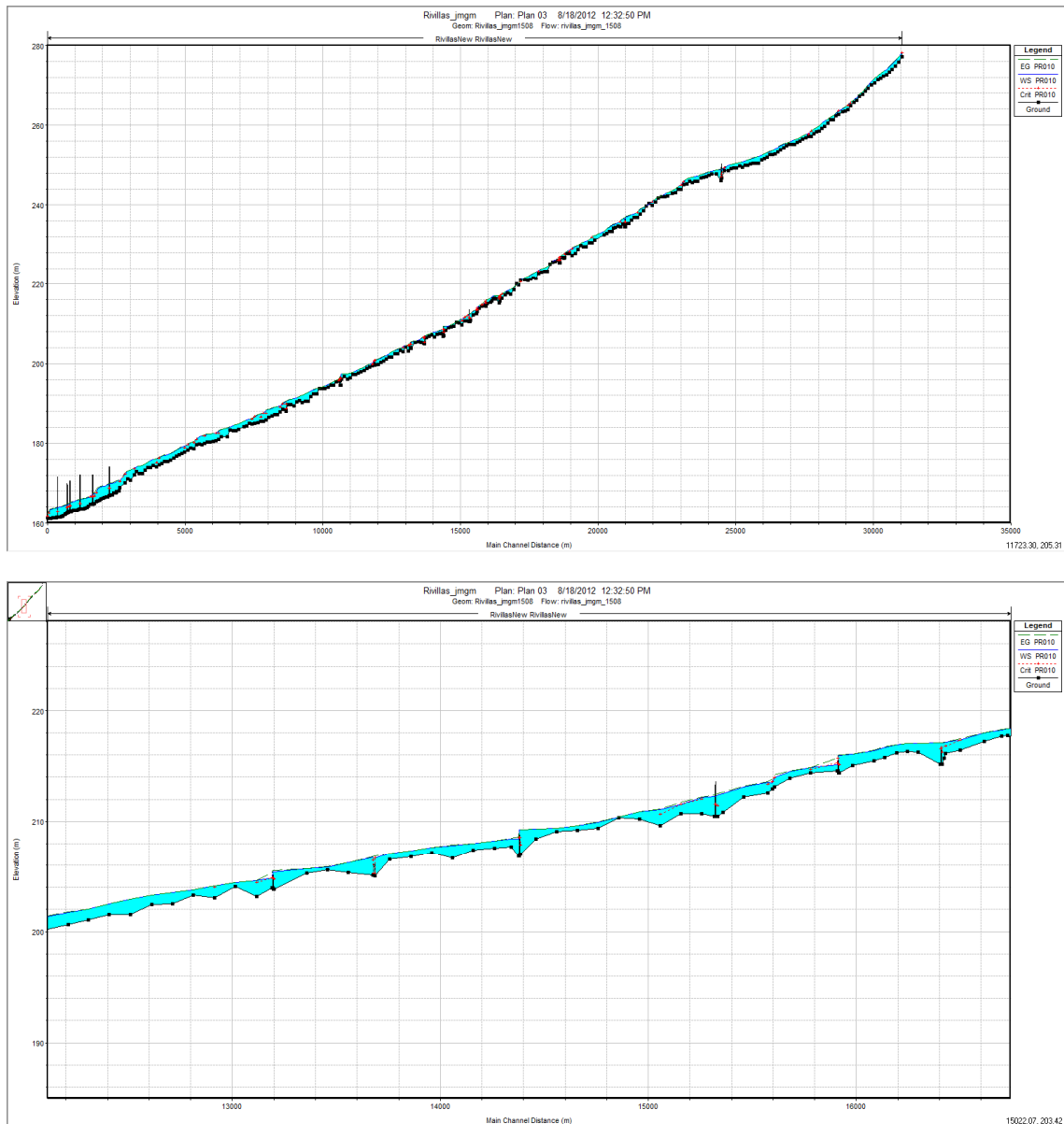


Si hemos preparado diversas geometrías (tramos y secciones) y varios caudales, aquí podremos elegir con cuáles de ellos vamos a ejecutar los cálculos.

También hemos de especificar si el régimen es subcrítico (lento) o supercrítico (rápido), lo que debe estar de acuerdo con las condiciones de contorno especificadas.

Lo que aparece en esta ventana como “Plan” es el conjunto de condiciones elegidas para efectuar la computación (geometría, caudal, régimen). En el menú *File* se puede guardar este “Plan” (*Save Plan*) o comenzar uno nuevo (*New Plan*). Picando en se ejecutará el modelo, y si no obtenemos mensajes de error, podremos ver los resultados.





- Creación de las geometrías necesarias para la modelización.

GENERACIÓN DE PRODUCTOS SIG PARA LA MODELIZACIÓN HIDRAULICA

Según se apunta en los puntos anteriores, los productos previos a la modelización mediante HEC-RAS necesitan de:

- Generación de un modelo digital del terreno.
- Digitalización de los ejes del río
- Digitalización de los márgenes del río
- Digitalización de la sección máxima de la zona inundable.
- Digitalización de zonas de vegetación.
- Digitalización de secciones donde con puentes, azudes, diques y zonas encauzadas.

Hemos explicado como digitalizar la geometría del río pero todo debe estar apoyado en el mejor MDT posible. En los siguientes apartados indicamos como se han obtenido los modelos a partir de datos LIDAR.

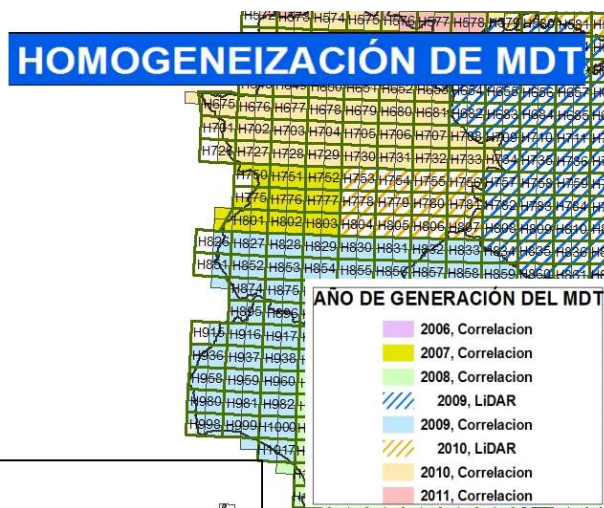
CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DIGITALES PARA CÁLCULOS HIDRÁULICOS APLICADOS A UNA CUENCA.

La modelización hidráulica requiere de modelos digitales del terreno con la mayor precisión y resolución posible.

En los últimos años la facilidad de acceso a información medioambiental ha crecido enormemente siendo posible acceder a modelos digitales generados a partir de diferentes tecnologías, destacando el LIDAR y los modelos obtenidos a partir del proceso de MATCHING en la fase aerotriangulación con pares fotogramétricos.

En el presente trabajo utilizaremos modelos digitales de elevación (MDE) a partir de datos LIDAR. El PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) lleva realizando desde el año 2008 vuelos de forma que queden cubiertos por datos LIDAR todo el territorio nacional.

En el siguiente gráfico se puede observar la naturaleza de los modelos digitales disponibles para la descarga en la zona de trabajo, tratándose en nuestro caso de las hojas 775, 776, 801 y 802. con datos procedentes de correlación y pertenecientes al vuelo de 2007.



Estos modelos tienen una resolución espacial de 5m. En el presente trabajo trataremos de mejorar la resolución de los modelos a partir de los datos LIDAR brutos. Estos datos no se encuentran disponibles y accesibles al público general, habiendo sido solicitados a la Junta de Extremadura, la cual los ha cedido para uso académico. Los datos no se encuentran tratados, es decir, no están clasificados y tienen puntos no depurados. El dato altimétrico de los datos LIDAR son alturas elipsoidales.

Por tanto, se hace necesario, clasificar los puntos LIDAR. Dado que el objeto de los modelos a generar es la modelización hidráulica, los modelos necesarios serían un MDE (Modelo Digital de Elevación) ó MDT (Modelo Digital del Terreno) donde quede representado el suelo desnudo, para poder determinar la lámina de inundación en régimen natural y un MDS (Modelo Digital de Superficie) en el que se podría incorporar la información de las obras de fábrica, para el cálculo del régimen alterado.

Estos modelos deben realizarse con software que permita su posterior utilización con el software de modelización hidráulica.

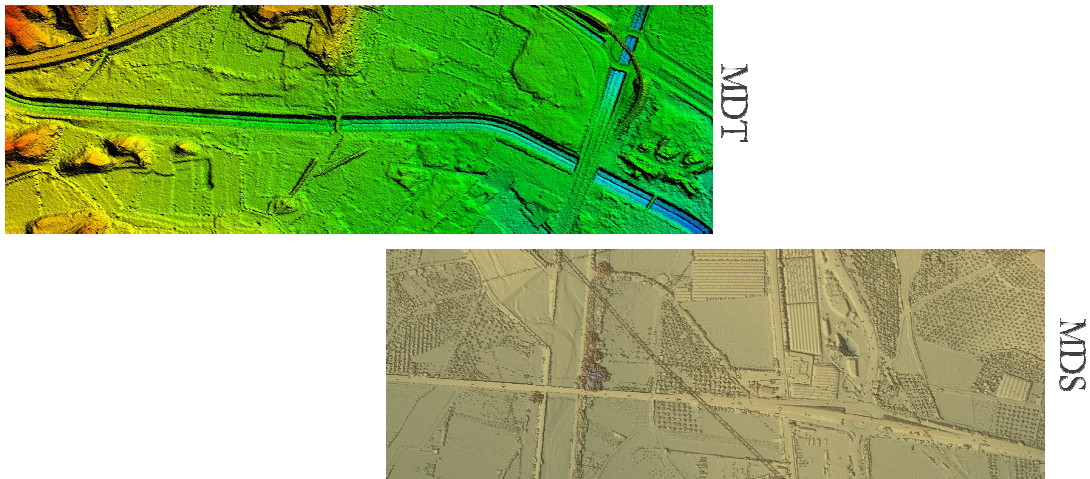
GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

Desde hace tiempo es bastante frecuente encontrar estudios, modelos y análisis que se valen de los Modelos Digitales de Elevación. La irrupción en los últimos años de la tecnología Lídár promete la obtención de modelos de elevación más precisos y de mayor resolución.

No obstante, los datos Lídár necesitan de tratamiento y cuando se pretende generar productos se requiere gran capacidad de cálculo, fuera de alcance, en la mayoría de las ocasiones de las computadoras domésticas, cuando se trata de grandes extensiones. De igual forma son muchas las

dificultades de tratar tal cantidad de información con las soluciones software habituales, dificultando la obtención de productos finales.

Trabajaremos con varios modelos digitales obtenidos a partir de diferentes tecnologías. Se procede a la generación de un MDT a partir de los datos LIDAR. Por otro lado, utilizaremos el MDT con paso de malla de 5 metros del PNOA, el cual ha sido obtenido con la técnica de *matching*.



Estos datos se incluyen dentro del proyecto PNOA con las siguientes características:

Características Técnicas

- Sistema Geodésico de Referencia ETRS89 (Península, Illes Balears, Ceuta y Melilla), y REGCAN95 (Canarias).
- Vuelo fotogramétrico equivalente a una escala de vuelo 1:15.000 (PNOA25) y 1:30.000 (PNOA50), con una cámara digital de alta resolución, equipada con sensor pancromático y 4 sensores multispectrales.
- Vuelo LIDAR con un sensor adecuado a las características técnicas descritas en las especificaciones técnicas del proyecto.
- Toma de datos GPS y sistema inercial IMU/INS en vuelo, para el procesado de la trayectoria del avión.
- Aerotriangulación digital por métodos automáticos.
- Modelo Digital de Elevaciones (MDE) calculado por correlación automática, o a partir de datos obtenidos con el sensor LIDAR.
- Ortoproyección a partir del Modelo Digital de Elevaciones depurado y editado.
- Generación de metadatos cumpliendo con el estándar internacional ISO 19115:2003, asegurando la interoperabilidad de la información generada.

	GSD Vuelo (cm)	GSD Ortofoto (cm)	Precisión altimétrica del Modelo Digital de Elevaciones	Paso de malla	Precisión planimétrica de la ortofoto
PNOA 50cm	45	50	RMSE $z \leq 2,00$ m	5m x 5m	RMSE $x,y \leq 1,00$ m
PNOA 25cm	22	25	RMSE $z \leq 1,00$ m	5m x 5m	RMSE $x,y \leq 0,50$ m
PNOA 10cm	9	10	RMSE $z \leq 0,20$ m (con LiDAR)	1m x 1m	RMSE $x,y \leq 0,20$ m
LIDAR			RMSE $z \leq 0,15$ m	1.41 x 1.41m	-

MODELO DIGITAL DEL TERRENO CON DATOS PNOA (MATCHING)

Este modelo ha sido utilizado para realizar análisis preliminares, presentación de la zona de estudio y comprobaciones en caso de dudas con los modelos o documentación.

En el proceso de aerotriangulación para la confección de ortofotografías del PNOA se obtiene un MDT por estereocorrelación utilizando puntos homólogos en al menos dos fotogramas.

Las características esenciales descritas en la propia página del CNIG son:

Modelo digital del terreno con paso de malla de 5 m, con la misma distribución de hojas que el MTN50. Formato de archivo ASCII matriz ESRI (asc). Sistema geodésico de referencia ETRS89 (en Canarias REGCAN95, compatible con ETRS89) y proyección UTM en el huso correspondiente a cada hoja. En Canarias el huso UTM es el 28. Según la hoja de que se trate, el MDT05 se ha obtenido de una de las dos siguientes formas: por estereocorrelación automática de vuelos fotogramétricos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con resolución de 25 a 50cm/píxel, revisada e interpolada con líneas de ruptura donde fuera viable, o bien por interpolación a partir la clase terreno de vuelos LIDAR del PNOA.

La descarga de estos modelos puede realizarse desde el portal web del Centro Nacional de Información Geográfica (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>) Se realiza la descarga de las hojas necesarias, en este caso se trata de las hojas 775, 776, 801 y 802.

Generación del MDT a partir de cada uno de los ficheros

El formato de los ficheros descargados es ASCII grid de ARC/INFO:

NCOLS ncols
NROWS nrows
XLLCORNER xmin
YLLCORNER ymin
CELLSIZE size
NODATA_VALUE nodata
z11 z12 z13 z14.....z1ncols
.....
znrows1 znrows2 znrows3...znrowsncols
Donde:
- NCOLS es el número de nodos por fila
- NROWS es el número total de filas,
- XLLCORNER y YLLCORNER son las coordenadas Suroeste de la malla
- CELLSIZE es el paso de malla
- NODATA VALUE es el valor asignado a los nodos para los que no se dispone de cota conocida
Las cotas de la malla están expresadas en metros, con un espacio en blanco entre valor y valor, y describen el terreno de norte a sur y de oeste a este.

Formato legible desde las aplicaciones con tecnología ESRI, concretamente ArcGIS.

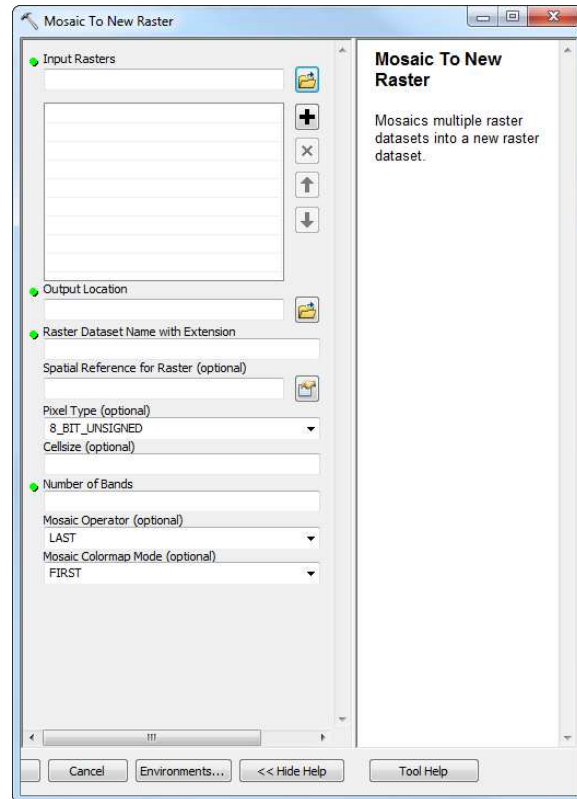
Utilizando las toolbox de ArcGIS versión 10 se realiza la transformación a formato Ráster de ArcGIS con la herramienta: *ASCII to Raster*:

Convertido cada uno de los ráster se procede a su mosaicado en un único fichero.

Mosaicado a nuevo ráster

Obtenido cada uno de estos ráster procedemos a mosaicarlos en un único ráster, con la herramienta: *Mosaic to New Raster*.

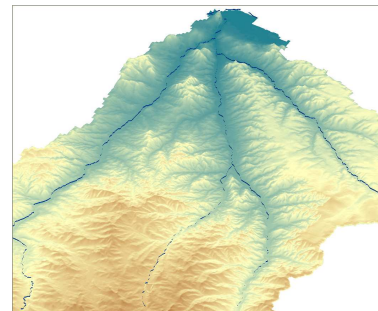
Por último y a efectos de presentación recortaremos el mosaico obtenido a partir de una poligonal que encierra la cuenca de ambos ríos más una distancia obtenida mediante un buffer.



Extracción mediante máscara

Vamos a recortar el modelo resultante con una máscara dada por el perímetro de la cuenca de los arroyos Rivillas y Calamón, más un buffer de 200 metros. Así obtendremos un modelo de la zona de estudio que nos permitirá conocer mejor la zona y estar en disposición de tomar decisiones sobre diferentes parámetros.

Esta operación la realizamos con las toolbox de ArcGIS, en concreto con la opción *Extract by Mask*.



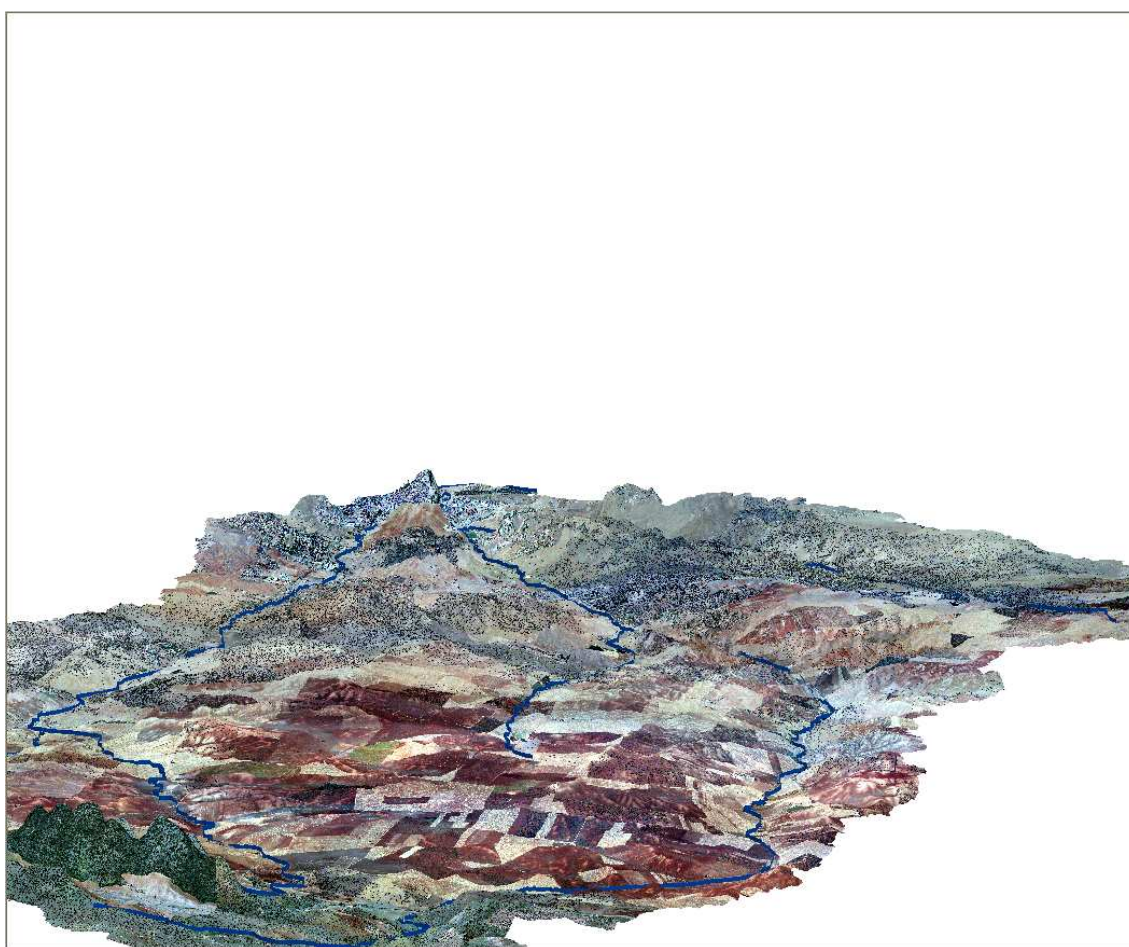
MOSAICO DE ORTOFOTOS PNOA

Siguiendo los mismos pasos que los descritos en la generación del MDT del PNOA se realizará un mosaico a partir de las ortofotos descargadas de la página de descarga del CNIG. Las herramientas utilizadas han sido:

- Mosaic to New Raster
- Extract by Mask

Sobre estas ortofotos se realizará la identificación de algunos de los elementos necesarios para la modelización hidráulica.

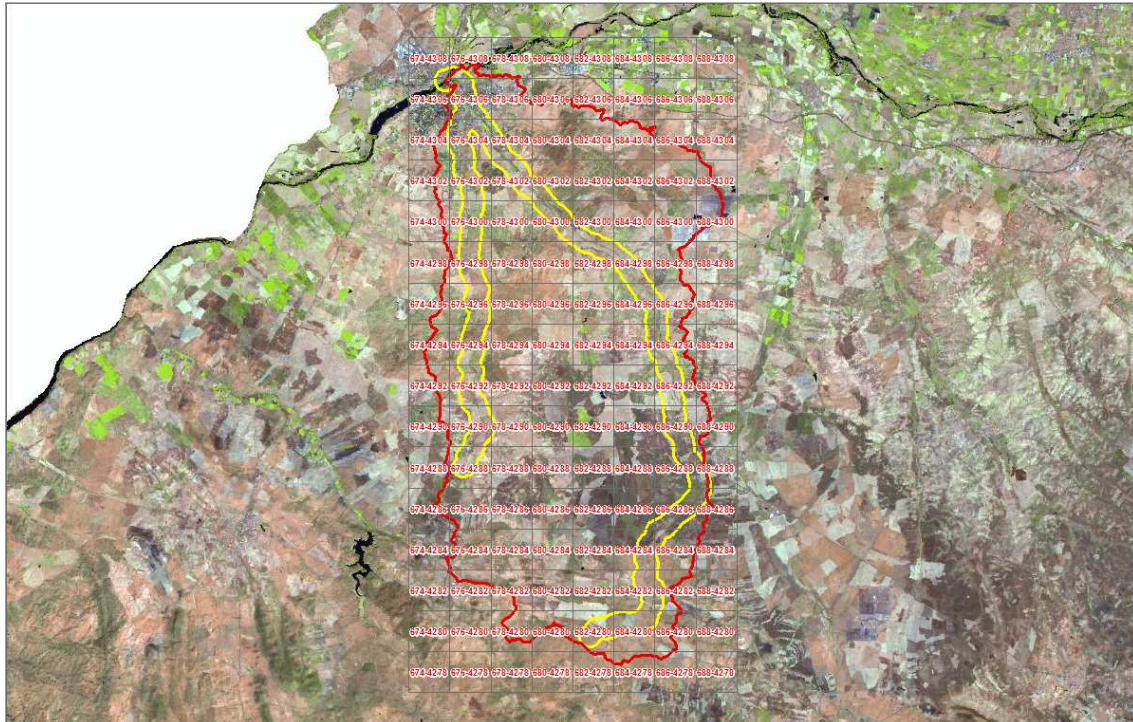
Podemos apreciar en ArcScene la combinación de superponer las capas del MDT, Ortofoto PNOA y capa de ríos, teniendo una referencia de la zona de estudio.



ANÁLISIS DE LOS DATOS LIDAR DE PARTIDA

Los datos Lídár están distribuidos en hojas de 1.000 x 1.000 metros. El nombre de cada fichero con extensión .las viene dado por la cuadrícula UTM, estando compuesto por el prefijo *PNOA_L9_2010_EXT_25cm_VL_las_sc* y los dígitos XXX-YYYY que corresponden con el millar de la coordenada X UTM e Y UTM, respectivamente.

Se trata en total de 128 ficheros .las distribuidos según se indica en el siguiente gráfico.



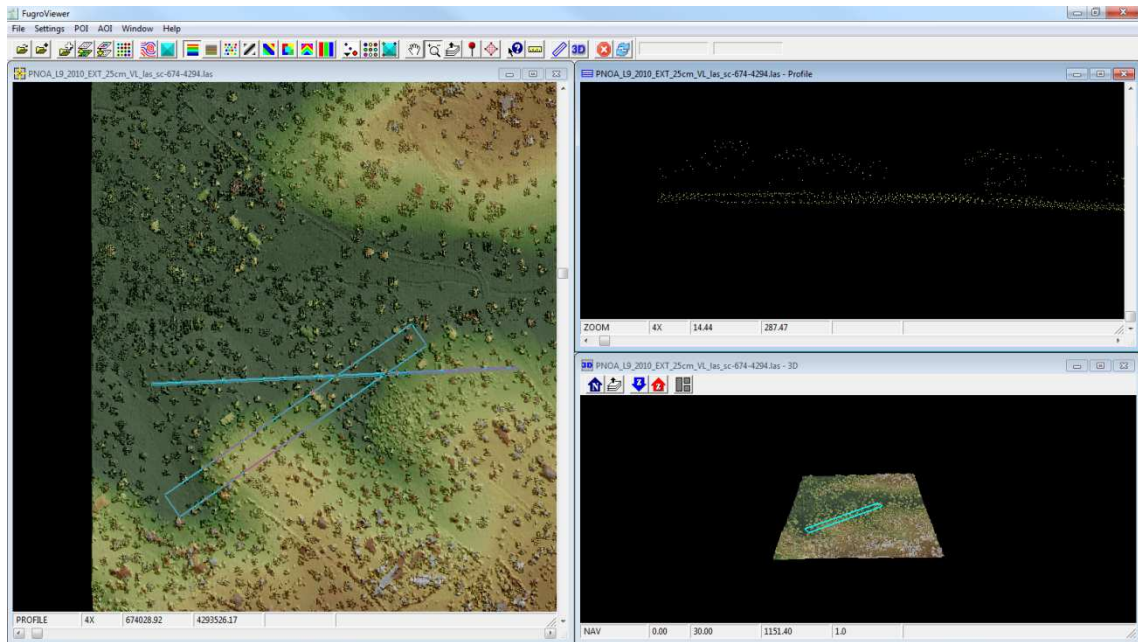
Resumiendo los datos de cabecera de unos de los ficheros LAS, se observa la versión y el software con los que se ha generado, así como el número de retornos que es de hasta 4 valores.

Project ID:	00000000-0000-0000-0000-000000000000
LAS Version:	1.1
System ID:	<empty>
Generating Software:	TerraScan
Return 1:	2954608
Return 2:	284896
Return 3:	323
Return 4:	0

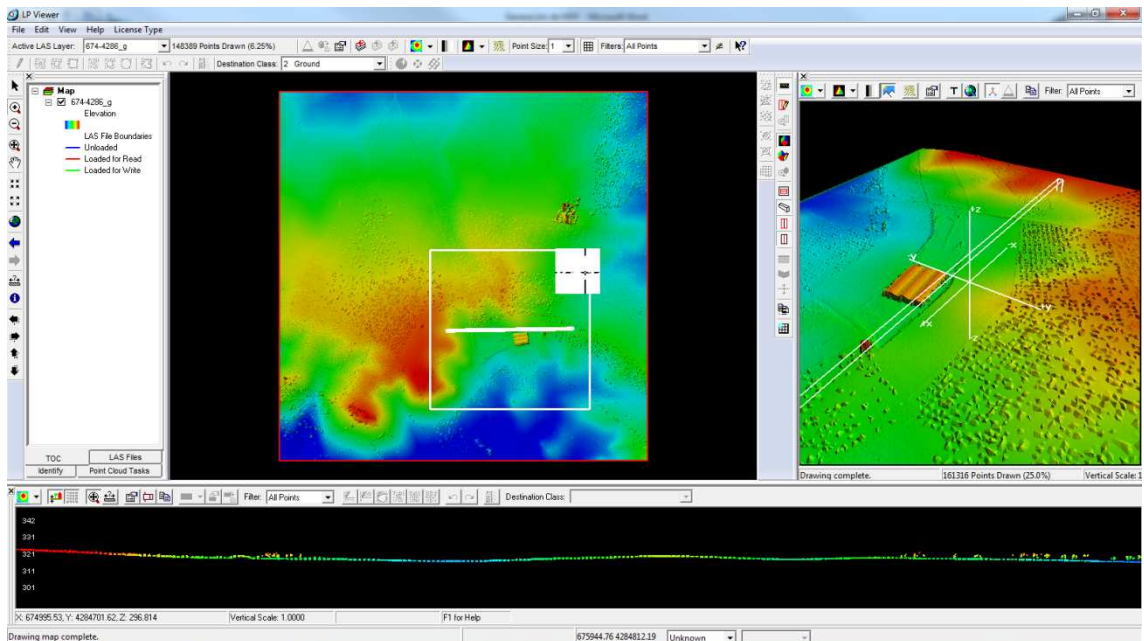
Para la visualización rápida de los datos se han barajado varias posibilidades de software gratuito hasta encontrar las alternativas que considero más conveniente. Entre el software probado está:

- FugroViewer
- LasEdit
- LP360 Viewer
- Dielmo Open LIDAR
- Fusion

De estos paquetes de software elegimos LP360 Viewer y FugroViewer como los más adecuados en la visualización de datos lídár.



Visualización con FugroViewer



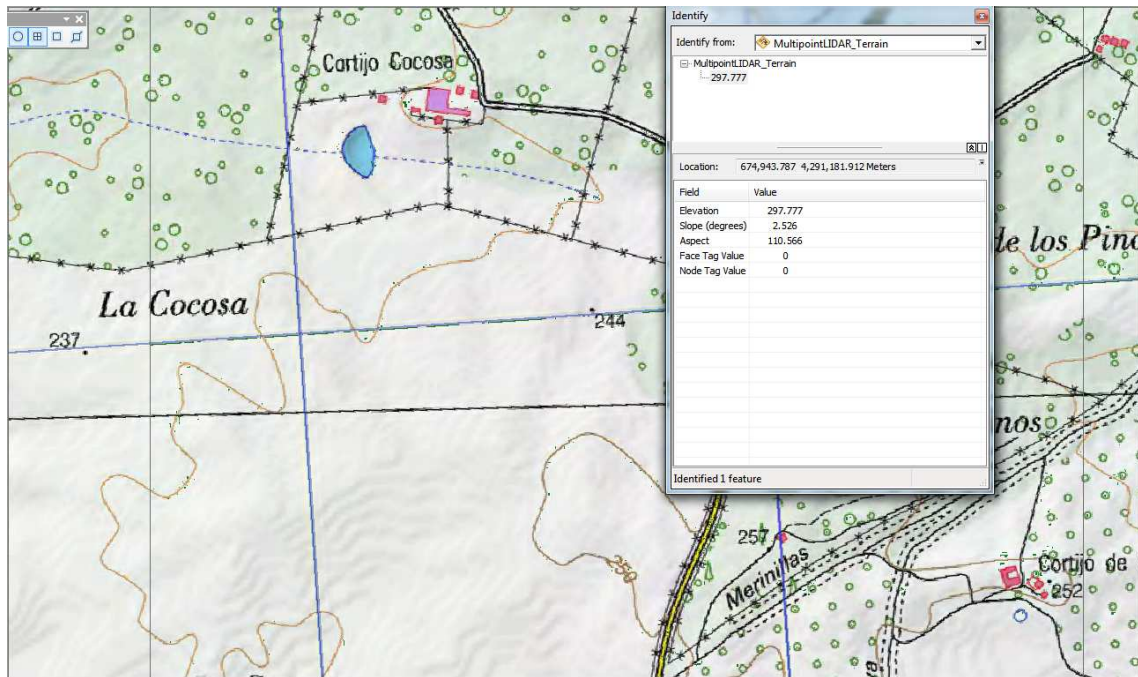
Visualización con LP Viewer

Análisis de los datos

En primer lugar se observa que los datos LIDAR de partida están sin clasificar, siendo por tanto necesaria la clasificación de los puntos para generar un MDT del terreno con los puntos que conforman el suelo desnudo.

Otra característica que se observa es que la alturas de los puntos LIDAR son alturas elipsoidales y no cotas ortométricas, factor que habrá de tener en cuenta en el caso de tener que utilizar otros modelos extraídos por otro medios.

En la siguiente imagen comparamos la cota de un punto sobre MTN25 (punto acotado de 244m. de altitud sobre el nivel del mar en Alicante) y la cota dada por el MDT LIDAR. Observamos una diferencia de unos 54m. que corresponden con la ondulación del geoide en la zona de trabajo.



Calculadora Geodésica

Datos de Entrada

Sistema de Referencia: ☒ ETRS89 ☐ ED50

Coordenadas: ☐ Geográficas ☒ UTM

Modo de Trabajo: ☒ Entrada Manual ☐ Desde Archivo

Coordenadas UTM

X (metros): 680000 Y (metros): 4296000 HUSO: 29

CALCULAR desde coordenadas UTM (ETRS89)

Resultados del cálculo

ETRS89

X: 680000.000 Y: 4296000.000 HUSO: 29 K: 0.99999893 W: 1° 17' 56" LONGITUD: -6° 55' 38.51012" LATITUD: 38° 47' 39.78782"

ED50

X: 680123.011 Y: 4296212.546 HUSO: 29 K: 0.99999944 W: 1° 17' 59" LONGITUD: -6° 55' 33.61741" LATITUD: 38° 47' 44.25195"

GEOIDE EGM08-REDNAP

N: 54.540 ξ ("): 3.5 η ("): 3.0

Marcar todos los resultados

Copiar marcados al Portapapeles

Calculamos la ondulación del geoide en un punto medio del ámbito de estudio utilizando el último modelo del geoide publicado por el IGN (EGM08-REDNAP) con la ayuda de la aplicación, publicada por el IGN, PAG (Programa de Aplicaciones Geodésicas).

Determinamos la ondulación del Geoide media en la zona de trabajo como la proporcionada en un punto central de esta, siendo de 54,54m. Generamos un nuevo modelo con alturas ortométricas.

Es necesario realizar una llamada de atención sobre este aspecto ya que no se debe aceptar una simplificación al problema como la que se ha tomado cuando se trata de modelización hidráulica.

Si analizamos de ondulación del geoide en las 4 esquinas de la zona de trabajo, obtenemos los siguientes valores:

Punto	Coordenadas ETRS89 UTM Huso29	Ondulación del Geoíde
Esquina Noroeste	674000; 4308000	54,478m
Esquina Noreste	690000; 4308000	54,134m
Esquina Suroeste	674000; 4276000	54,955m
Esquina Sureste	690000; 4276000	54.944m

Como puede observarse en la zona de trabajo tenemos diferencias de hasta 0.8m., que no han sido trasladadas al modelo final, de forma, que este no refleja fielmente las diferencias de potencial gravimétrico en la zona de trabajo.

Habría que corregir la cota de cada uno de los puntos LIDAR según la ondulación del Geoíde, siendo esta la única forma de tener un modelo con cotas ortométricas, el único usable para la modelización hidráulica.

A pesar de estas consideraciones, emplearemos el modelo simplificado mencionado anteriormente, ya que la corrección de cada uno de los puntos está fuera del alcance de los objetivos del trabajo planteado y su vez el modelo considerado no introduce errores locales, si no globales en la totalidad de la zona de trabajo y por tanto nos permitirá el desarrollo de la metodología que se pretende probar.

CLASIFICACIÓN DE LOS DATOS LIDAR

Para poder generar el Modelo Digital del Terreno que necesitamos será necesario realizar una clasificación de los datos LIDAR de partida.

La clasificación de los datos LIDAR es un proceso complejo. En él se utilizan diferentes algoritmos que se valen de diferentes variables que aportan los datos LIDAR, como son, la altura del punto, el orden del retorno para un punto y la intensidad del retorno.

Se estudian varias alternativas, con software comercial y no comercial. Las alternativas manejadas han sido:

- Lastools
- TerraScan
- LP360
- VrMESH
- LIDAR Analyst
- Fusion
- LasEdit

Para poder evaluar las diferentes alternativas ha sido preciso la lectura de documentación referente a las herramientas y la instalación del software. Algunas opciones han sido rápidamente descartadas, mientras que otras han sido analizadas.

Se pone de manifiesto la complejidad y la necesidad de potencia de cálculo necesaria para la clasificación de los datos LIDAR. Dada la naturaleza de los objetivos del presente trabajo, se pretende la obtención de un modelo digital del terreno del suelo desnudo (bare-earth).

Las dos opciones finales, dentro de las analizadas para la clasificación de los puntos terreno son Lastools y Terrascan. Se ha realizado la clasificación mediante ambas aplicaciones y se han comparado resultados. A continuación se presenta un breve resumen del proceso:

Clasificación mediante LasTools

La clasificación se realiza con el comando *lasground.exe* sobre cada uno de los 128 ficheros. Según la propia documentación:

<p>Lasground.exe Esta es una herramienta para la extracción de tierra desnuda: clasificando los puntos LIDAR como puntos terreno (clase = 2). La herramienta funciona muy bien en ambientes naturales como montañas, bosques,</p>
--

campos, colinas u otros terrenos con pocos objetos artificiales.

La herramienta también produce excelentes resultados para la ciudad pero para edificios más grandes que el tamaño de paso pueden ser problemáticos. El tamaño predeterminado del paso es de 5 metros, que es bueno para el bosque o montañas. Para ciudades o terrenos planos el paso se incrementa a 10 metros. Para ciudades o polígonos industriales se incrementa el tamaño de paso a 25 metros. Para grandes ciudades se aumenta el tamaño de paso a 50 metros.

Es importante saber si la herramienta horizontal y unidades verticales son metros (que se supone por defecto) o 'pies' o 'elevation_feet'. El archivo LAS debe contener la información de proyección, no siendo necesario especificarlo explícitamente.

Por defecto, la herramienta sólo considera el último retorno. Anteriores devoluciones son consideradas puntos no terreno. Se puede desactivar esta función por '-all_returns'.

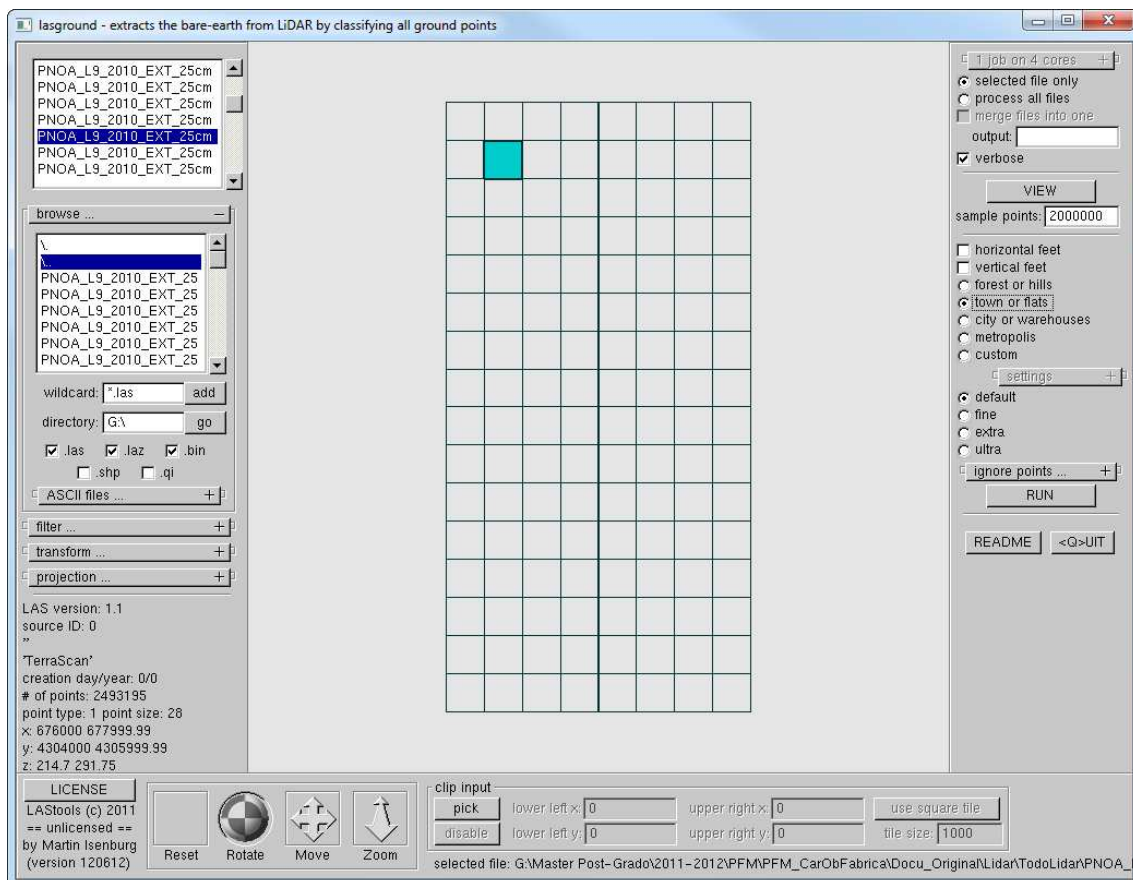
La fineza del algoritmo puede determinarse eligiendo la búsqueda inicial fine o extra_fine, coarse o

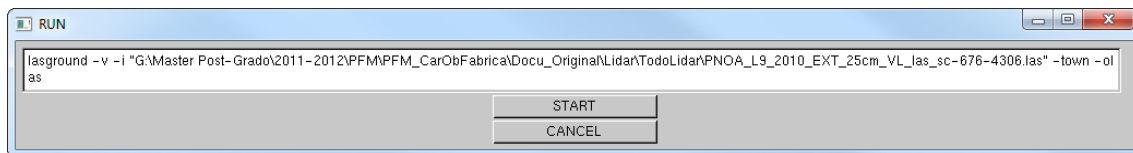
'extra_coarse'

El usuario experimentado puede ajustar el algoritmo por especificación el umbral en metros al que conseguir eliminar picos. Ajuste '-spike 0.5' quitará hasta picos por encima de 50 centímetros y picos por debajo de 5 metros

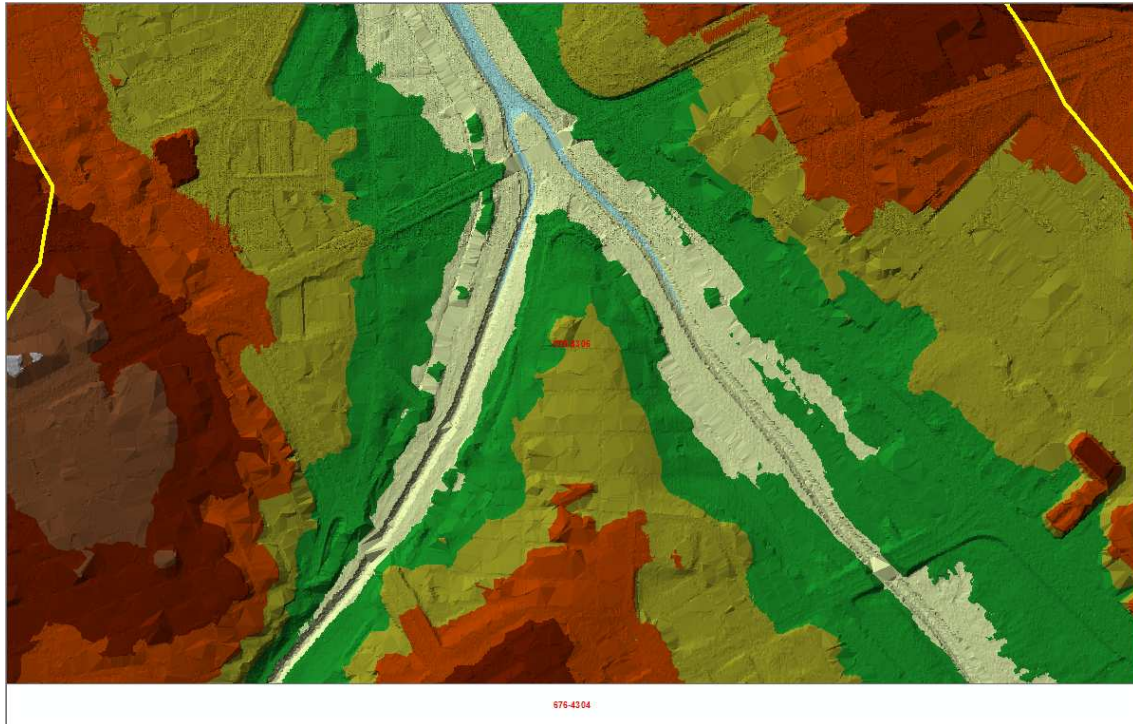
La desviación máxima para parches planares en centímetro puede establecerse con '-stddev 10' y el máximo desplazamiento en metros arriba para que obtenga puntos por encima de la estimación actual de la tierra puede establecerse con '-offset 0.1'.

Se realiza mediante un proceso masivo con ayuda del propio software. La herramienta permite algunas opciones de configuración en función del tipo de terreno a clasificar según





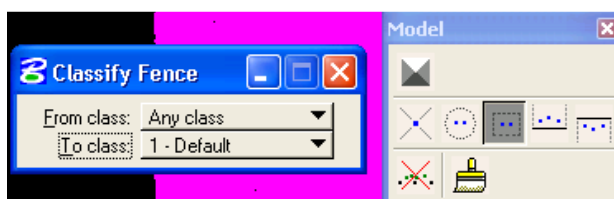
El resultado es la clasificación del suelo desnudo sin edificios.



Clasificación con Terrascan:

Se ha realizado un ensayo de clasificación con TerraScan sobre 3 hojas del total de 126 que componen la zona de trabajo, llevando a cabo los pasos descritos a continuación.

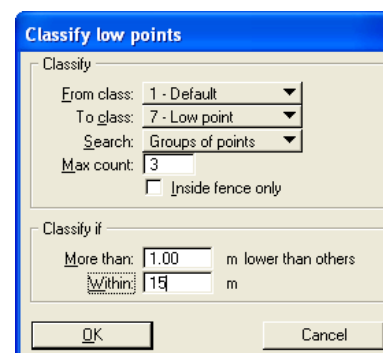
Desclasificamos la nube de puntos, para partir de cero, para luego intentar volver a clasificarla. Definimos un cerco y pasamos todas las clases a la clase *Default*.



Para clasificar la nube de puntos nos vamos a valer de macros que nos van a permitir realizar varios procesos de forma encadenada.

Clasificación del Suelo y Puntos Bajos:

Puntos Bajos. (Low point classification). Utilizaremos una macro para su clasificación. Podemos hacerlo desde el menú de TerraScan en *Tools* → *Macro*. Aparece el Cuadro de Dialogo “Macro Step” y

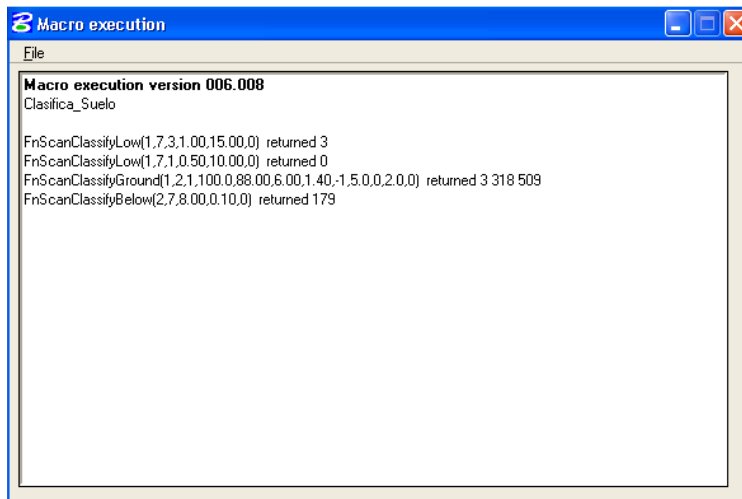


seleccionamos “low points”. Lo configuramos tal y como aparece en la imagen.

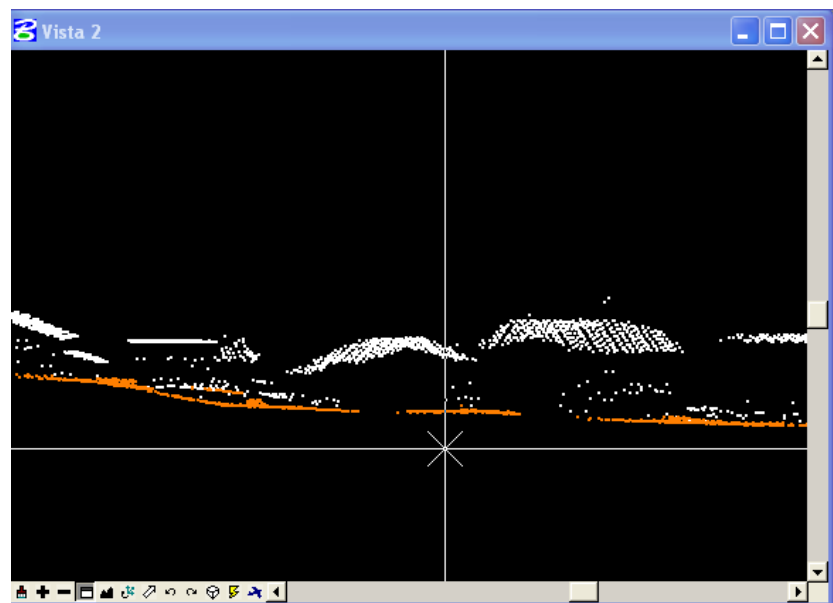
Añadimos a la macro los siguientes tres procesos:

- “Classify low points”, para puntos sencillos.
- “Ground Classifications”, donde indicamos que las construcciones no son mayores de 100m.
- “Below Surface” para detectar puntos por debajo del terreno.

Le damos el nombre a la macro de “Clasifica Suelo” y ejecutamos la macro con el siguiente resultado:



Si visualizamos por clase de punto podemos ver cómo han quedado clasificados los elementos de Suelo y Puntos Bajos.



Se ha tratado de clasificar los puntos en otras clases que podrían ser de utilidad pero no necesariamente imprescindibles. Se ha tratado de clasificar los edificios, vegetación baja y vegetación alta. Con esta clasificación podría obtenerse un Modelo Digital de Superficie.

Partimos de que la nube tiene la clase suelo clasificada. Definimos una macro con las siguientes operaciones:

- “Classify by Class” de Suelo a Baja Vegetación.

- “Classify by height from Ground”. Ponemos como umbral entre baja y media vegetación los 0.3m.
- “Classify by height from Ground”, poniendo como umbral separador los 2.5m para distinguir entre baja y alta vegetación.

Hemos guardado la macro como *ClasificaVegetacion.mac*. Ejecutamos la macro.

```
Macro execution version 006.008

ClasificaVegetacion

FnScanClassifyClass(1,3,0) returned 1 872 683

FnScanClassifyHgtGrd(2,100.0,3,4,0.30,2000.00,0) returned 1 107 960

FnScanClassifyHgtGrd(2,100.0,4,5,2.50,2000.00,0) returned 491 370
```

Por último se realiza la clasificación de edificios con la herramienta building.

Conclusiones sobre ambas herramientas en la clasificación de datos LIDAR

Terrascan es un programa profesional que ofrece muchas posibilidades pero que necesita de una buena preparación del entorno de trabajo. Requiere de un equipo potente con gran cantidad de memoria RAM. Durante el ensayo de clasificación los equipos domésticos utilizados en este trabajo no podían trabajar a partir de extensiones mayores a unos 4 kilómetros cuadrados y los procesos de clasificación más exigentes, como es el de edificios, necesitaron de periodos de varias horas para ejecutar el cálculo para 1 kilómetro cuadrado de datos.

La clasificación del suelo desnudo es rápida con Terrascan, pero obliga a cargar varios ficheros a la vez para realizar la clasificación, teniendo problema de memoria a partir de extensiones superiores a 5 kilómetros cuadrados. Además los puntos una vez clasificados deben ser exportados.

Como alternativa el comando lasground del conjunto de herramientas de lastools realiza la operación de forma sencilla y con una interfaz que ayuda a la configuración de un proceso masivo. También permite la configuración del algoritmo en función de diferentes parámetros.

Una vez clasificadas ciertas zonas de referencia con ambos software y comparados sobre alguno de los visores no presentan grandes diferencias en la clasificación. Para realizar este análisis se han recorrido zonas del cauce clasificadas con ambos programas, no pudiendo determinarse que ninguna de las dos clasificaciones fuera óptima ni una mejor que la otra.

Finalmente y dada las limitaciones en el procesado de la información se lleva a cabo la clasificación mediante la herramienta de LasTool

GENERACIÓN DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO CON DATOS LIDAR

Antes de crear un modelo digital del terreno con puntos LIDAR hay que tener en cuenta una serie de consideraciones, como:

- Número de puntos LIDAR.
- Densidad de puntos LIDAR.
- Resolución del modelo digital a obtener.
- Formato de los modelos de salida.

Algunos de los condicionantes han sido descritos y analizados con anterioridad.

El número de puntos LIDAR es de 306.634.397, volumen de datos suficientemente grande como para presentar dificultades en su tratamiento y procesamiento.

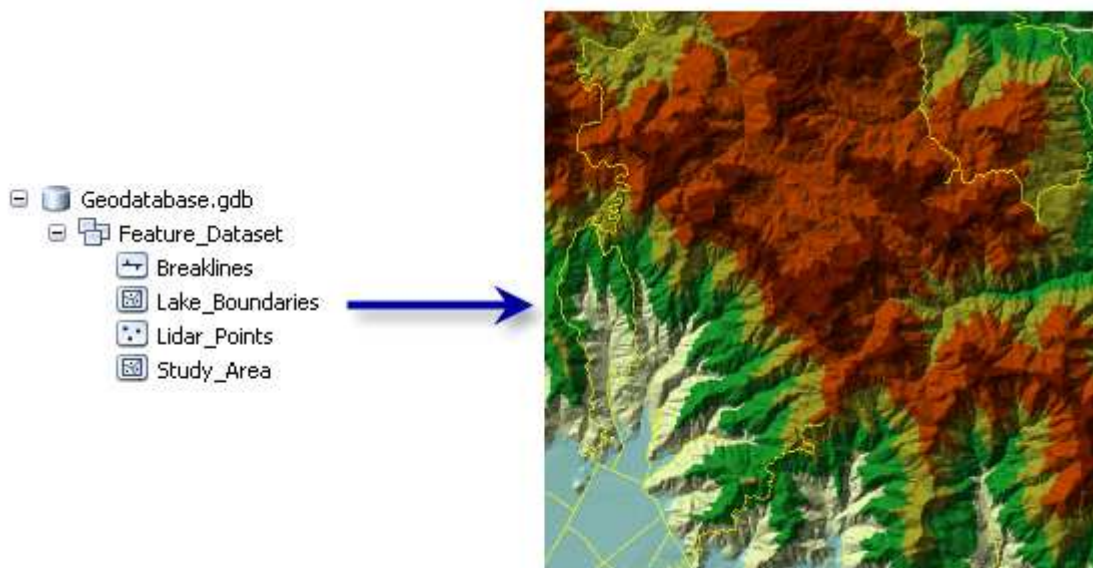
La distancia media entre puntos podemos redondearla a 1,5m, ya que el pliego de condiciones la ha establecido en 1,41m. Esta distancia se ha comprobado en algunos puntos y con la herramienta 'Point File Information' de las Toolbox de ArcGIS.

En cuanto al formato de salida del modelo, podemos utilizar cualquiera (TIN, ráster, terrain de ArcGIS) que luego pueda ser leído por la aplicación HEC-GeoRAS. Esta aplicación corre sobre ArcMAP y será utilizada para generar la geometría útil para HEC-RAS.

El único punto, no resuelto, es decidir la resolución del Modelo Digital del Terreno que podemos obtener. Para poder aprovechar la mayor precisión y resolución del LIDAR utilizaremos modelos de triangulación vectorial (tin) para los cálculos, en concreto, utilizaremos los Terrain Dataset de ArcGIS.

Dedicaremos unas líneas a describir este formato de almacenamiento de información planimétrica y altimétrica que apareció con las últimas versiones de ArcGIS 9.

Un Terrain Dataset es una superficie basada en TIN de resolución múltiple creada a partir de datos almacenados como entidades en una geodatabase. Generalmente, se hacen a partir de fuentes LIDAR, sonar y fotogramétricas. Los Terrain Dataset se alojan en la geodatabase, dentro de los dataste de entidades con las entidades que se utilizaron para crearlos.

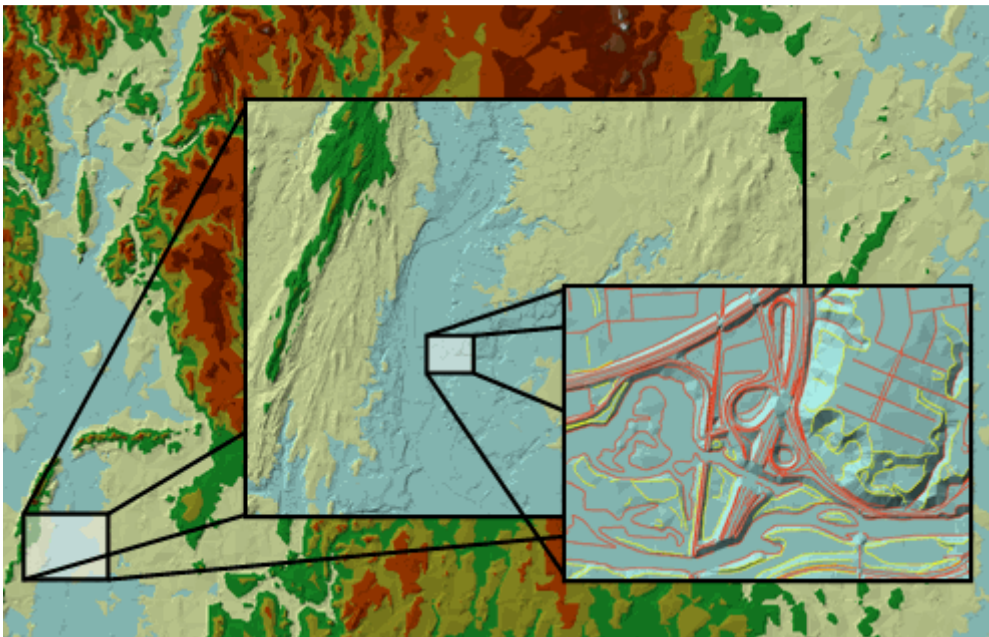


Los terrenos tienen reglas similares a las topologías. Las entidades comunes que actúan como fuentes de datos para los terrenos suelen ser:

- Entidades multipunto de puntos de relleno 3D creadas desde una fuente de datos tal como LIDAR o sonar.
- Entidades de puntos y líneas con geometrías 3D.
- Límites del área de estudio utilizados para definir los límites del Terrain Dataset .

Las reglas del Terrain Dataset controlan cómo se utilizan las entidades para definir una superficie. Las reglas también pueden indicar cómo participa una clase de entidad a través de un rango de escalas.

Un Terrain Dataset en la geodatabase hace referencia a las clases de entidad originales. En realidad, no almacena una superficie como un ráster o un TIN. En su lugar, organiza los datos para una recuperación rápida y deriva un superficie TIN al vuelo. Esta organización implica la creación de "pirámides" de terreno que se utilizan para recuperar rápidamente sólo los datos necesarios para crear una superficie del nivel de detalle requerido (LOD) para una determinada área de interés (AOI) desde la base de datos. El nivel de pirámide adecuado se utiliza en relación a la escala de visualización actual o puede elegirse según las funciones de análisis del usuario, por lo tanto, el nivel de resolución adecuado se utiliza para satisfacer los requisitos de exactitud.



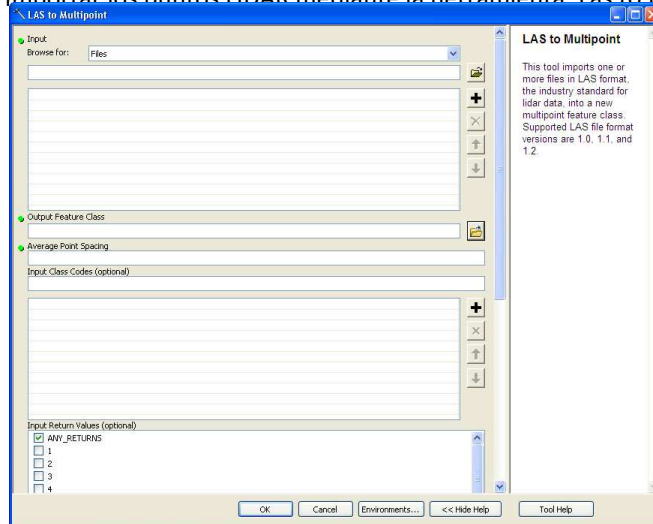
También trataremos de obtener un MDT ráster. Tratando de perder la menor precisión posible se generará un MDT con paso de malla de 2m. Otras referencias bibliográficas y para una densidad similar en los datos LIDAR de partida, proponen resoluciones de 3m. El IGN, recientemente (julio 2012) ha publicado en el centro de descargas MDT generados a partir de datos LIDAR con resolución de 5m. al igual que los obtenidos a partir de datos procedentes de la aerotriangulación del PNOA mediante *Matching*.

A continuación describiremos los pasos seguidos para generar los modelos, tanto el vectorial como el ráster.

Modelo Digital del Terreno. TERRAIN DATASET:

1. Crear una *File Geodatabase* en *ArcCatalog*.
2. Crear en la *File Geodatabase* un Dataset de Entidades.

3. Importar los puntos LIDAR mediante la herramienta: Las to Multipoint.



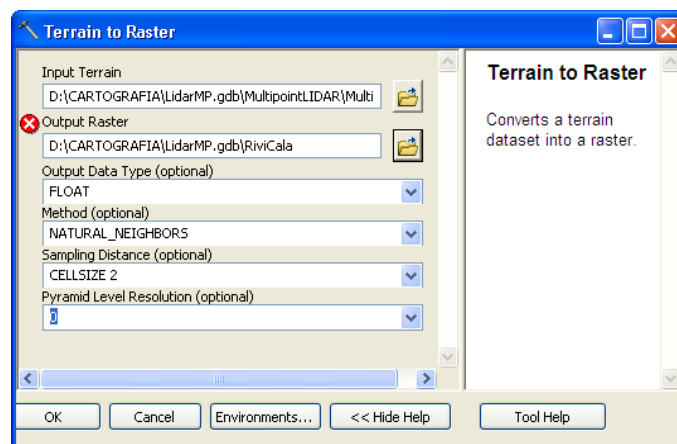
En este caso queremos obtener un MDT o MDE y partimos de una nube de puntos ya clasificada, donde la clase 2 corresponde con la de suelo desnudo, según los códigos definidos por la IPSRS. Haremos constar esta circunstancia en la opción Input Class.

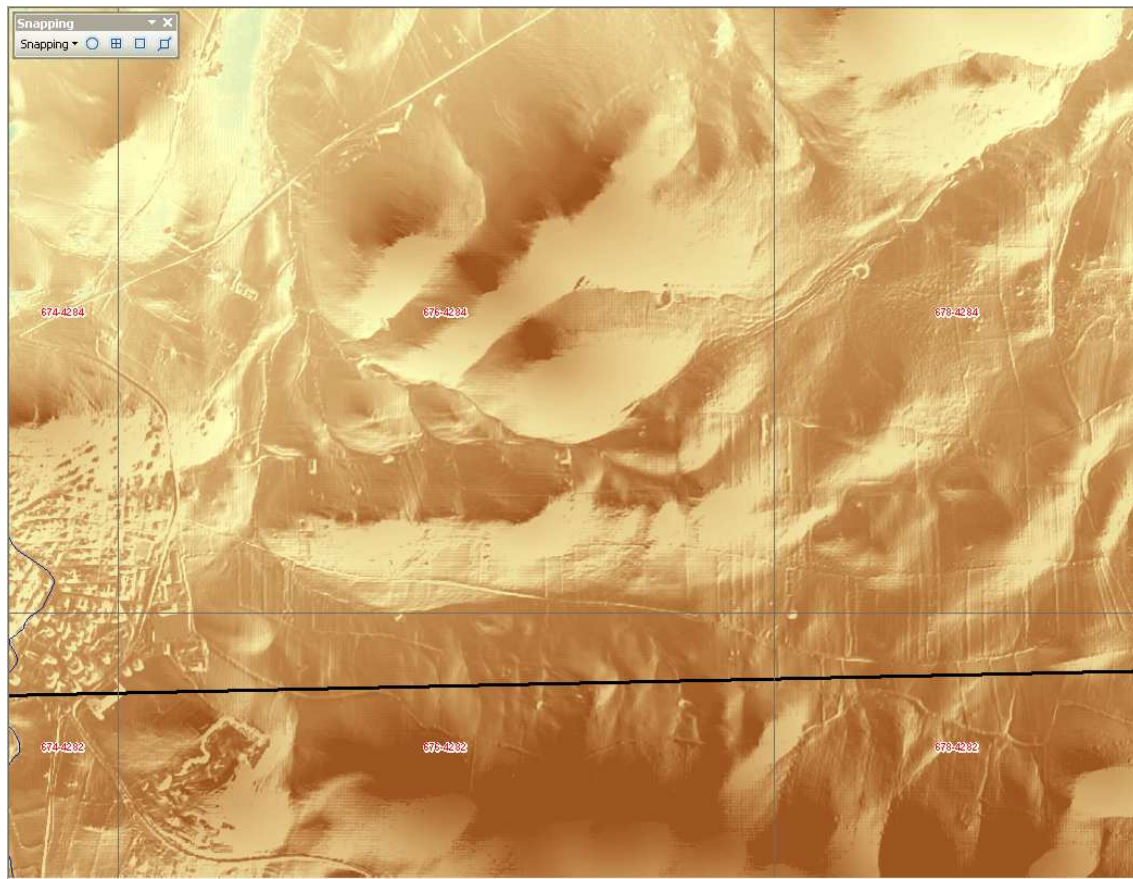
4. Una vez importado los datos LIDAR, en ArcCatalog y sobre el Dataset, pinchar en el botón derecho del ratón y seleccionar la opción *New Terrain*. El programa guía al usuario por una serie de pasos que concluye con la generación del Terrain Dataset y sus pirámides.

Modelo Digital del Terreno. RASTER DATASET:

Una vez disponemos de un MDT en formato Terrain Dataset, resulta sencillo obtener un MDT ráster con la herramienta Terrain to Raster.

A continuación podemos observar el resultado:



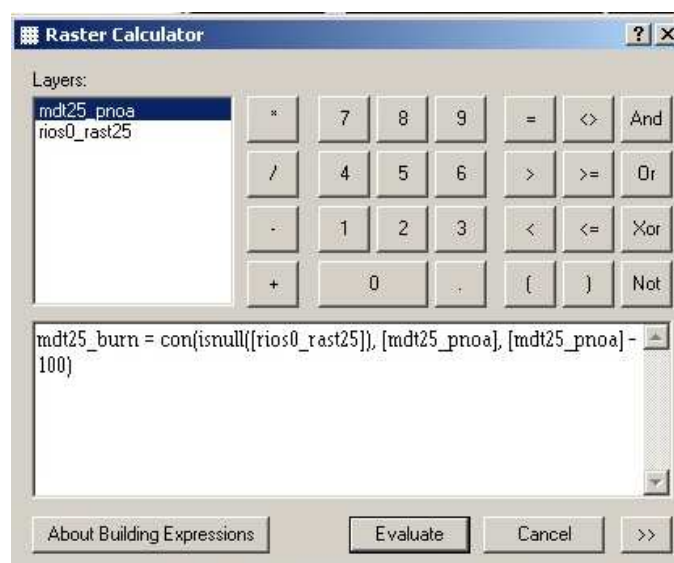


MODELO DE DIRECCIÓN DE FLUJO Y MODELO DE ACUMULACIÓN DE FLUJO

A partir del MDT ráster realizado con datos LIDAR y con una resolución de 2m. se han realizado 2 nuevos modelos que ayudan a la descripción hidrológica de la cuenca objeto de estudio. Estos modelos son el modelo de dirección de flujo y el modelo de acumulación de flujo.

Previamente al cálculo de estos modelos conviene modificar el MDT incorporando a este una red hidrográfica ya conocida, de forma que se produzca el grabado de esta superficie sobre el MDT. El proceso de preparación del modelo es:

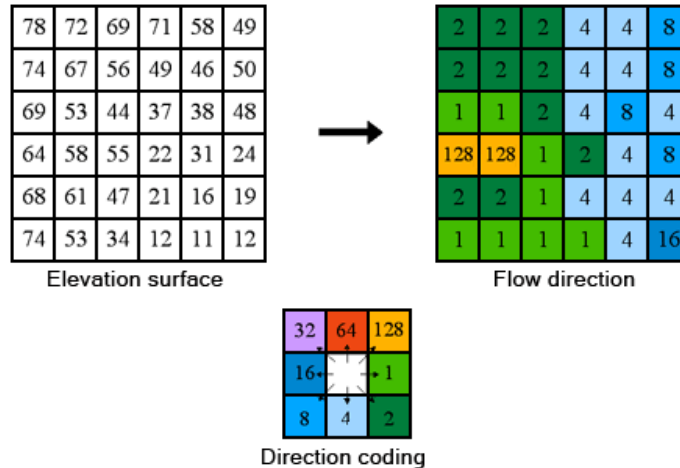
1. Rasterización de las coberturas de la red hidrográfica, coincidente en extensión y tamaño de celdas con el MDT original.
2. Se genera un nuevo MDT, aplicando el proceso de clavado (burning in) de la red hidrográfica. La forma más sencilla de realizarlo es con la calculadora ráster :



Modelo de Dirección de Flujo

Para la generación de este modelo se requiere de un MDE de entrada y proporciona como salida un ráster que muestra la dirección del flujo que sale de cada celda. Si se elige la opción Forzar todas las celdas de eje para que se desplacen hacia fuera, todas las celdas en el eje del ráster de superficie convergen en un punto.

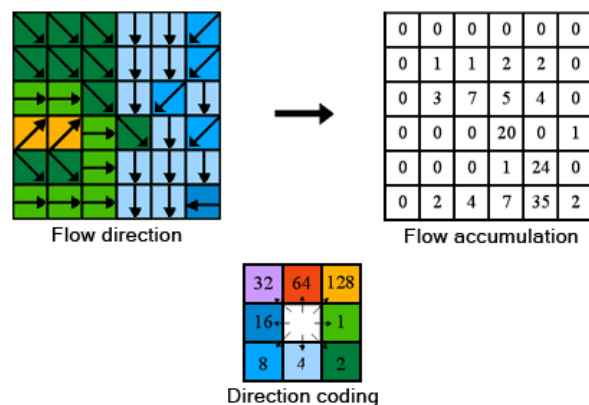
Existen ocho direcciones de salida válidas que se relacionan con las ocho celdas adyacentes hacia donde puede ir el flujo. Este enfoque comúnmente se denomina el modelo de flujo de ocho direcciones (D8) y sigue un acercamiento presentado en Jenson and Domingue (1988).



Modelo de Acumulación de Flujo

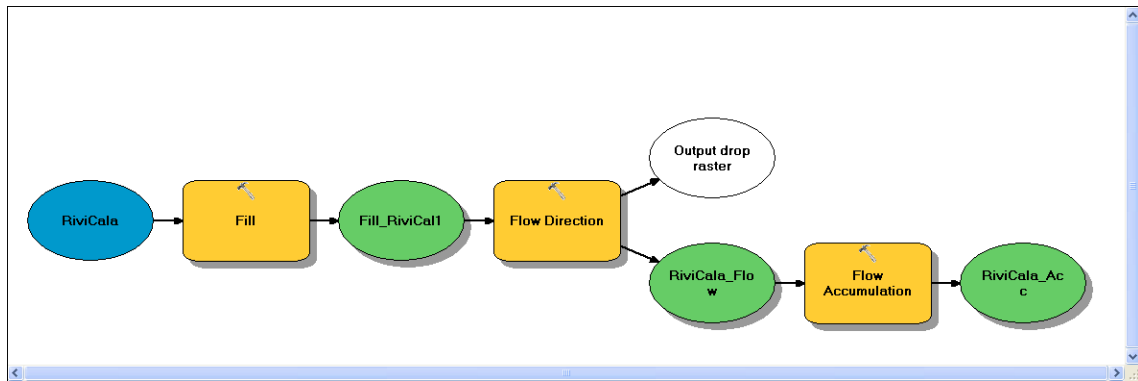
La herramienta Acumulación de flujo calcula el flujo acumulado como el peso acumulado de todas las celdas que fluyen en cada celda de pendiente descendente en el ráster de salida. Si no se proporciona un ráster de peso, se aplica un peso de 1 a cada celda, y el valor de celdas en el ráster de salida es el número de celdas que fluyen en cada celda.

En el siguiente gráfico siguiente, la imagen superior izquierda muestra la dirección de viaje desde cada celda y la superior derecha el número de celdas que fluyen hacia cada celda.



Las celdas con una acumulación de flujo alta son áreas de flujo concentrado y pueden ser útiles para identificar canales de arroyos

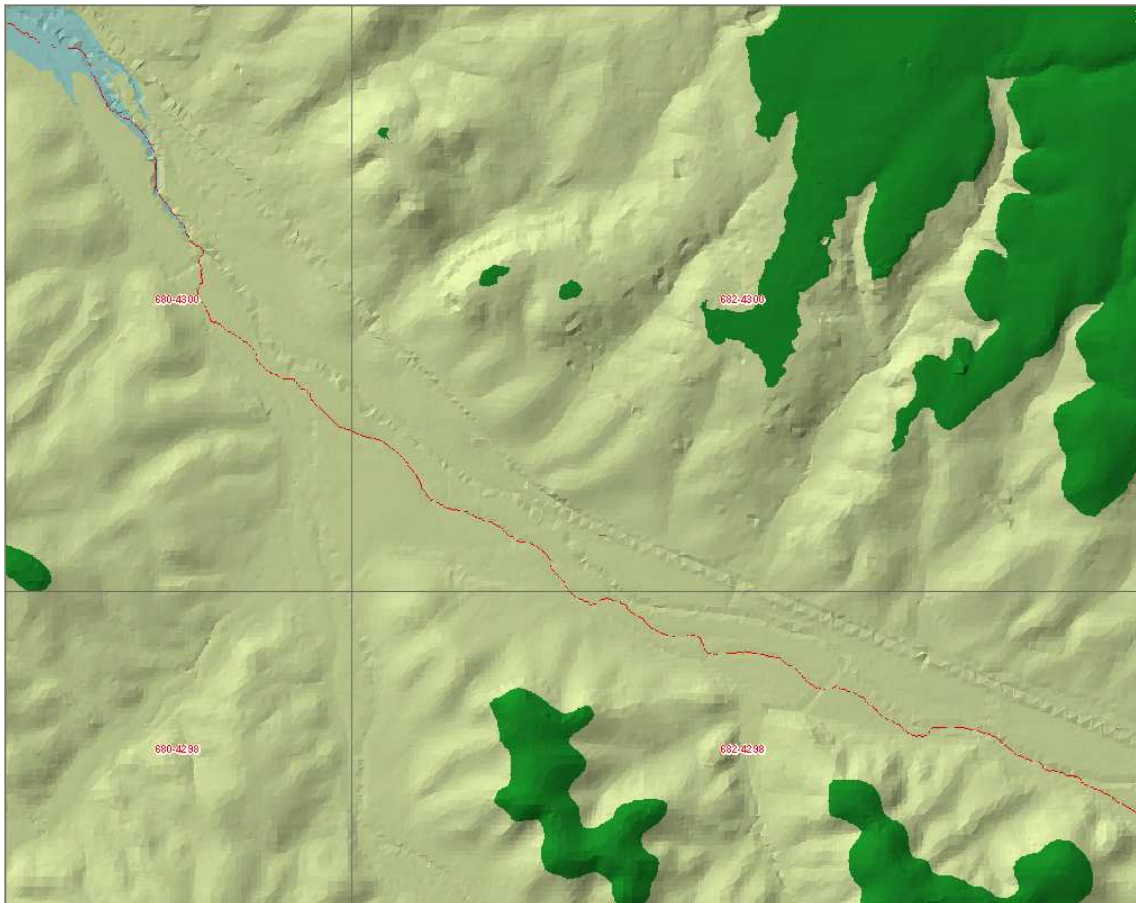
El proceso para la obtención de estos ráster viene dado por la ejecución de los siguientes comandos en Model Builder:



Donde la herramienta FILL se utiliza para rellenar los posibles sumideros (celdas a partir de las cuales el sistema no podría determinar el flujo).

El modelo resultante es un ráster con valores que son mayores en cuanto mayor es la acumulación de flujo. Valores altos representarían zonas de flujo alto. Si jugamos con la simbología, podemos obtener una red de drenaje más o menos densa y compararla con el MDE del LIDAR original o con la ortofoto. (En rojo líneas de flujo dadas por el modelo).





Si bien resulta evidente la acción de la mano del hombre en su voluntad de dirigir el transcurso del cauce mediante canalizaciones y zanjas, los cuales pueden observarse en la imagen superior, los modelos de acumulación a partir de modelos digitales nos dan información sobre el que sería el flujo natural. Lo que aquí se observa mediante modelos puede también ser observado con la simple fotointerpretación de las ortofotografías.

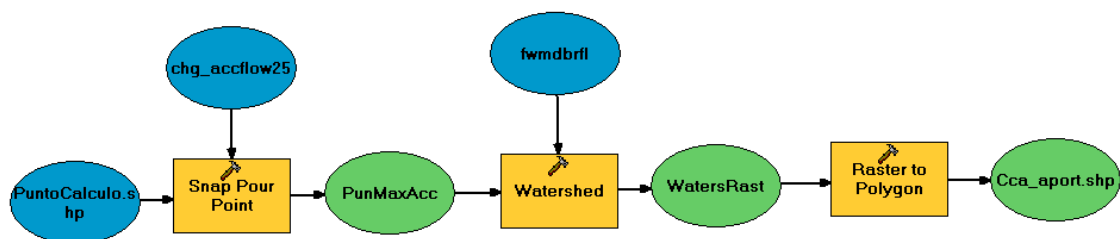
En la imagen de la derecha puede advertirse las trazas del cauce natural sobre la zona de labor agrícola.



DETERMINACIÓN DE LA CUENCA DE LOS RÍOS RIVILLAS Y CALAMÓN

Para identificar la cuenca vertiente de los arroyos Rivillas y Calamón y acotar el estudio nos valdremos de herramientas SIG, en concreto de ArcGIS y la extensión Spatial Analyst.

El proceso seguido es el siguiente:

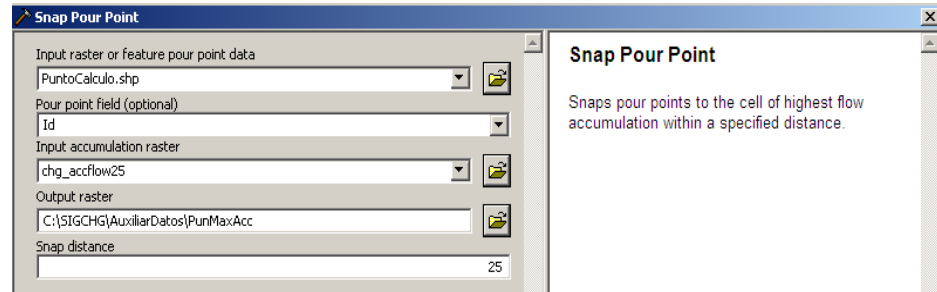


Donde:

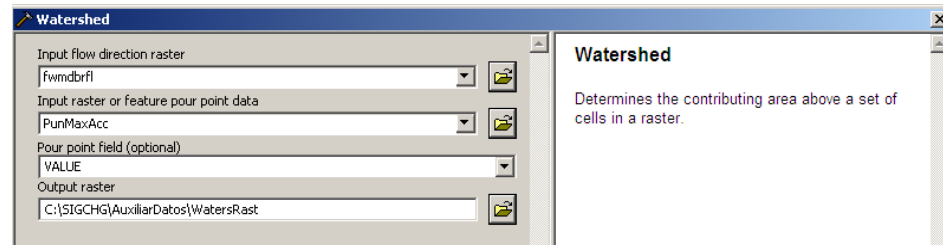
- **Son datos de entrada (azul):**
 - PuntoCalculo.shp → Punto para el que se calcula la cuenca vertiente.
 - Chg_accflow25 → Ráster de Acumulación de flujo.
 - Fwmdbrfl → Modelo de dirección de flujos.
- **Son datos auxiliares:**
 - PunMaxAcc → Punto de Máximo acumulación en el entorno del punto.
 - WatersRast → Cuenca vertiente en formato ráster.
- **Es el resultado final:**
 - Cca_apor.shp, cuenca vertiente en formato vectorial.
- **Son operaciones, sobre los datos (Cajas amarillas):**

- **Snap Pour Point:** Calcula la máxima acumulación de flujo en una distancia dada a un punto a partir de un modelo de acumulación de flujo.

NOTA: Se ha definido esta distancia como 25 m., de forma que pueda buscar únicamente en los píxeles vecinos.

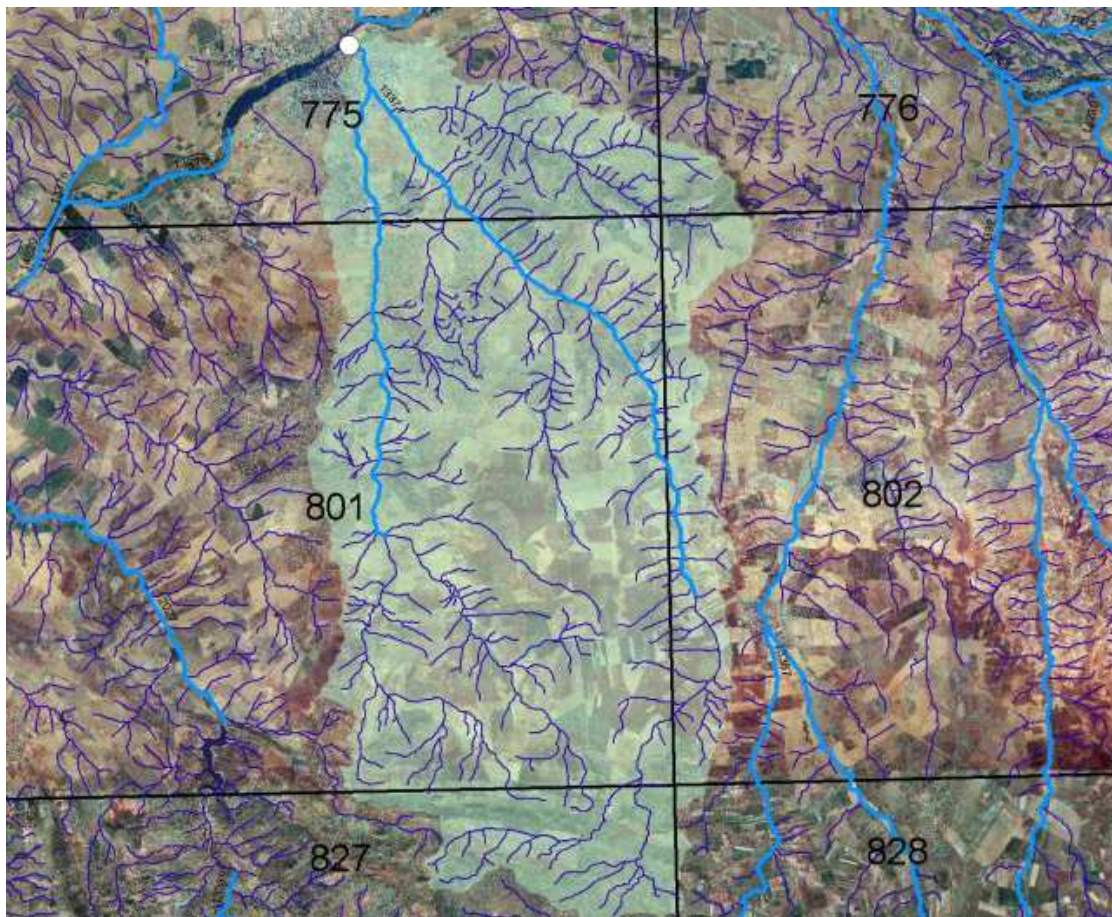


- **Watershed:** Devuelve un ráster con la cuenca vertiente a un punto a partir de un modelo de dirección de flujo.



- **Raster To Polygon:** Devuelve un polígono vectorial a partir de un ráster.

Así el resultado obtenido ha sido una capa con la cuenca vertiente en la desembocadura de los Ríos Rivillas y Calamón en el Río Guadiana.



TOMA DE DATOS DE CAMPO

Una vez definida la zona de trabajo e identificados los puntos a visitar se realiza la toma de datos en campo. El principal objetivo del método propuesto en el presente trabajo es reducir al máximo el tiempo de toma de datos en campo y a la vez, potenciar la extracción de información.

Las fases de la toma de datos en campo se pueden resumir en:

- Preparación del equipo auxiliar
- Preparación del equipo instrumental
- Localización y acceso al punto de interés
- Tomas fotográficas.
- Croquis de la obra.
- Mediciones de referencia.

Para la localización a los puntos de interés nos hemos ayudado de un teléfono móvil con sistema operativo Android 2.3 dotado de GPS, concretamente de un HTC Wildfire, dispositivo que se puede considerar dentro de la gama media-baja en dispositivos móviles. Sobre este hemos utilizado el software Orux Maps, donde previamente hemos descargado las ortofotos desde el servicio WMS del PNOA y cargado los puntos de interés, en este caso las obras a visitar.

Para la definición de los puntos de interés se ha recorrido sobre ArcGIS y con la ortofoto de máxima actualidad del PNOA la zona de estudio, identificándose aquellas intersecciones de los cauces con diferentes tipos de vías. Los puntos generados han sido exportados al formato KML e incorporados como puntos de interés en OruxMaps. El software tiene un sistema de aviso cuando se encuentra cerca del punto de interés que resulta de gran ayuda.



Una vez situado en la zona de estudio se realizan las tomas fotográficas teniendo en cuenta la morfología de la obra de fábrica y las características del terreno y la vegetación.

En algunas ocasiones resulta imposible llevar a cabo un conjunto de tomas suficientemente bueno que permita la modelización de la obra de fábrica, aumentando por tanto el número de medidas que se realizan in situ de forma que pueda obtenerse la geometría de la obra.

Se realiza un croquis y se toma nota de las mediciones y de las fotos que corresponden con la obra de fábrica.

En la fase preliminar se han realizado algunos ensayos con elementos auxiliares que permitan dotar de un sistema de coordenadas propio a la escena.

TRABAJOS DE GABINETE. PROCESADO DE DATOS

Una vez realizado el trabajo de campo comienza el trabajo de gabinete donde procesaremos las tomas en busca de los objetivos deseados.

CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE PUENTE Y OBRAS DE FÁBRICA

En puntos anteriores hemos descrito la capacidad y los pasos a seguir con el software Agisoft PhotoScan para la generación de modelos 3d a partir de varias imágenes.

A continuación describimos el proceso de toma de medidas sobre el modelo de forma que podamos obtener la geometría necesaria de las obras de fábrica.

Utilizaremos la estructura de la siguiente imagen como ejemplo. Se trata de una estructura que no está presente en los cauces de los Ríos Rivillas y Calamón, si no en el Arroyo de la Charca en el polígono industrial Ramapallas de Olivenza.



El entorno de la obra es bastante despejado dando facilidades en el momento de realizar las tomas. Además, esta obra presenta aletas en dirección el flujo, lo que nos permitirá ver la capacidad del método para levantar elementos en varios planos dentro de la misma obra de fábrica.

Se realizan 5 tomas:



IMG_8174.JPG



IMG_8176.JPG



IMG_8178.JPG

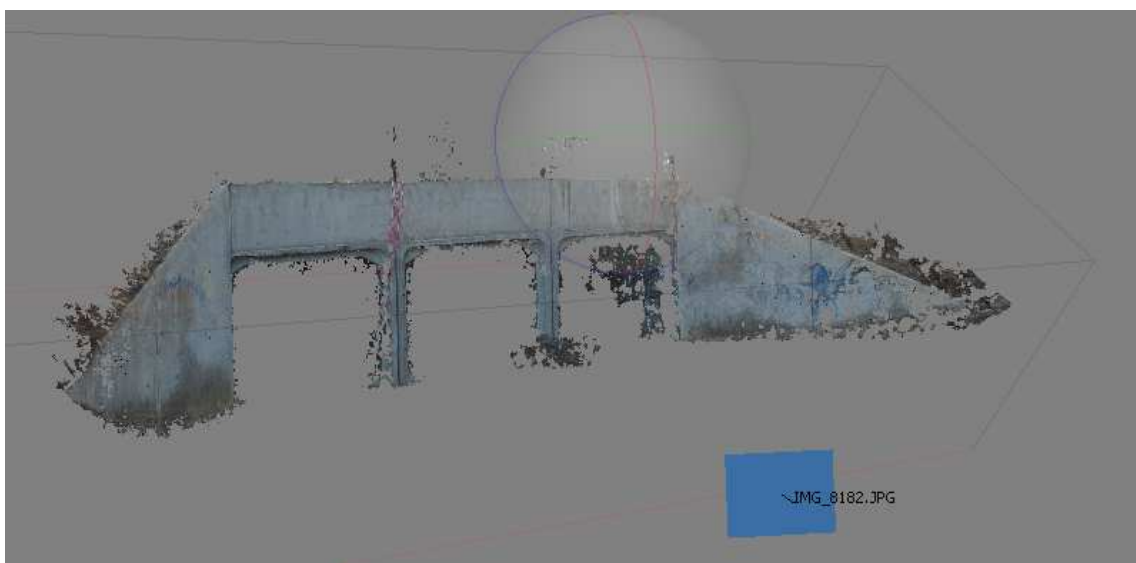
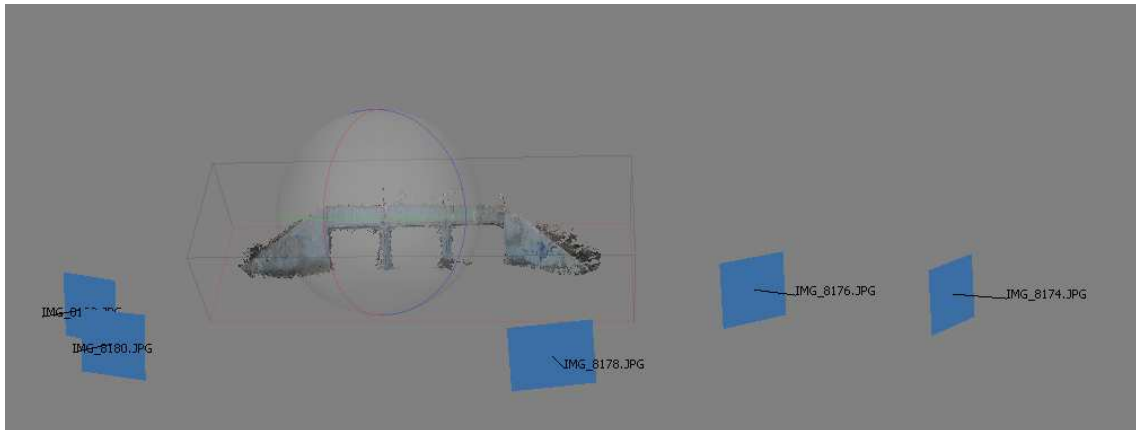


IMG_8180.JPG

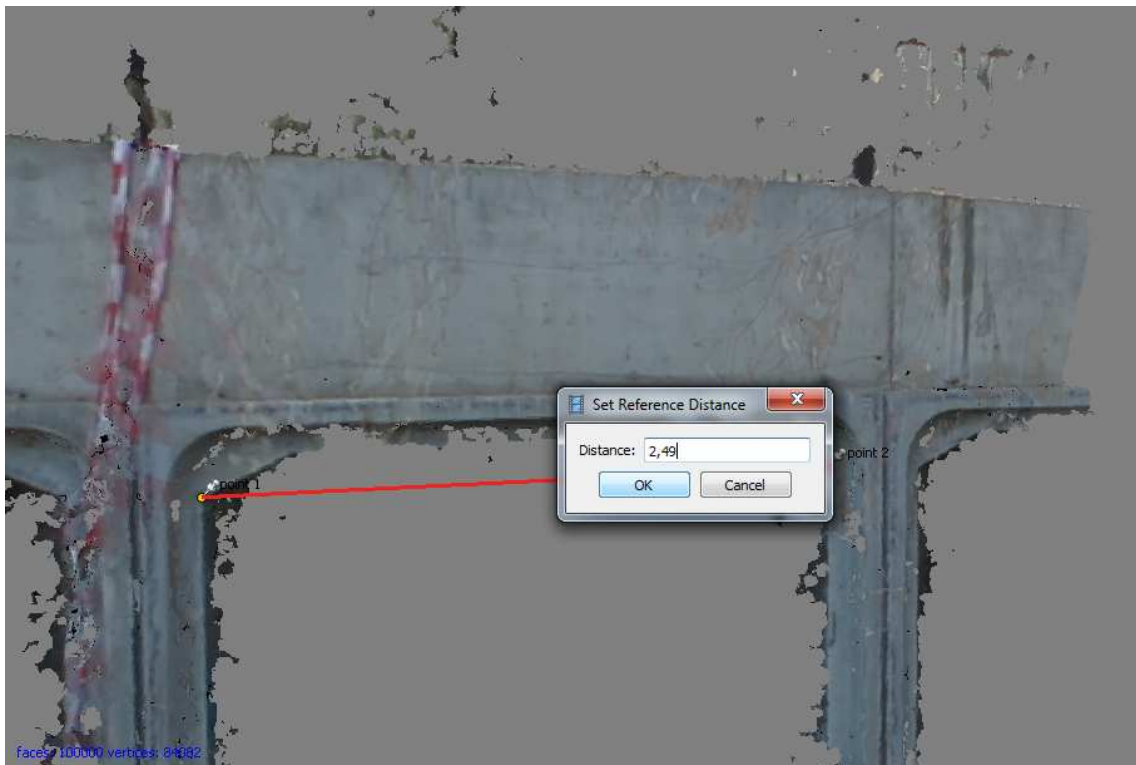


IMG_8182.JPG

y tras seguir los paso ya descritos en el análisis realizado sobre el software PhotoScan obtenemos el siguiente modelo:



Sobre la obra de fábrica se han medido las dimensiones de las cajas, que nos debe servir para poder escalar el modelo.

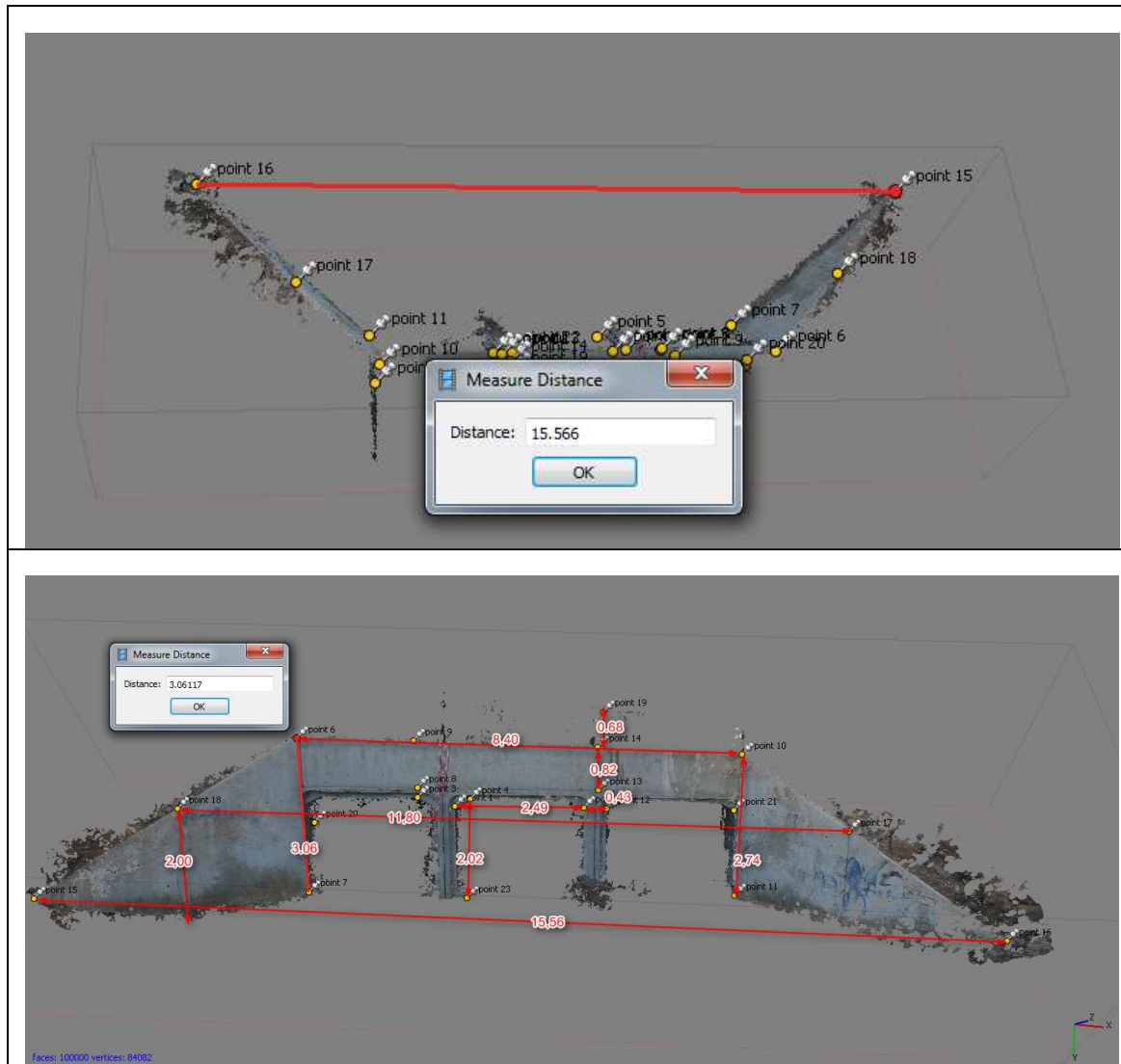


Es conveniente tomar esta medida con el mayor cuidado posible, siendo conveniente ajustar la situación de cada uno de los puntos en cada una de las tomas fotográficas.



Una vez escalado el modelo comprobamos con alguna otra medida realizado, por ejemplo el alto de la caja de la sección.

Y seguimos realizando mediciones:



OBTENCIÓN DE LA COTA SUPERIOR DE LA ESTRUCTURA

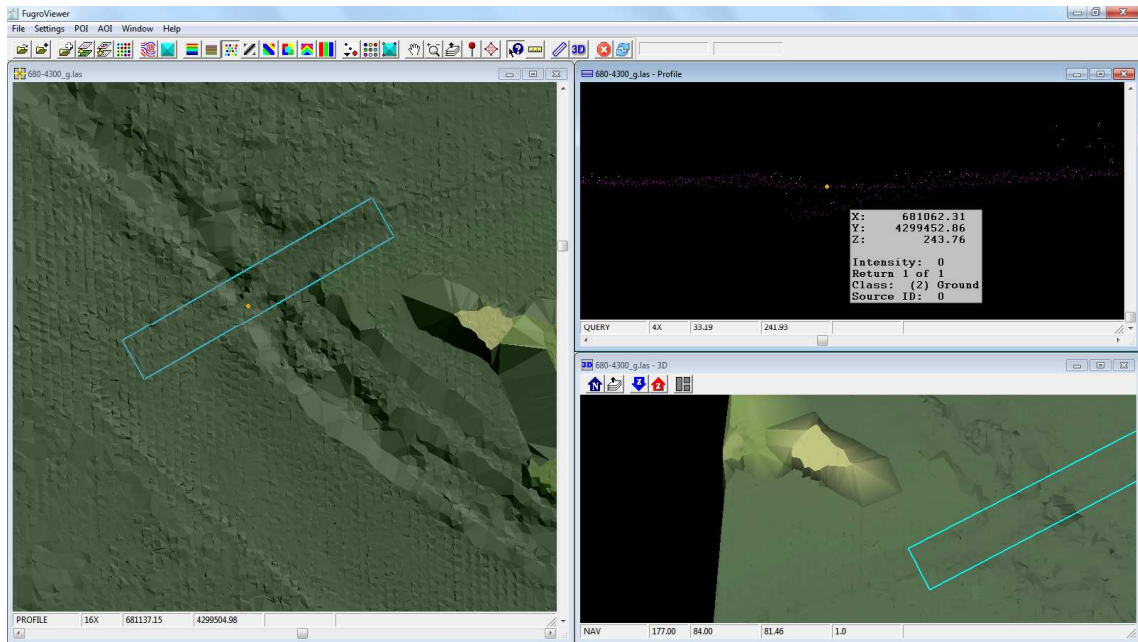
Bien en el caso de modelización de un puente o una obra de fábrica, es fundamental tener un buen dato de la cota superior de la estructura.

Este proceso que no es posible realizar a partir del modelo 3D generado y referenciado a un sistema local de coordenadas, puede ser fácilmente resuelto con los propios datos LIDAR. Tanto en el caso del tablero de un puente, como en la plataforma que corona un terraplén en una obra de fábrica, donde tendremos una plataforma fácilmente identificable y del que podremos obtener la cota a partir de los datos LIDAR.

Hay que tener en cuenta que dado que los datos LIDAR están en altura elipsoidal, deben transformarse a cota ortométrica teniendo en cuenta la ondulación del geoide.

La obtención de la cota (Ejemplo para Rivillas 017) se realiza directamente sobre los datos LIDAR y con el software FugroViewer, realizando un perfil sobre el terreno de forma que se pueda observar la zona de cauce como la del tablero.

Como puede apreciarse en la siguiente imagen es fácil distinguir tanto en el perfil como en la vista en planta la plataforma superior de la estructura.



DISEÑO DE FICHAS DE CARACTERIZACIÓN DE OBRAS DE FÁBRICA

Una vez realizado el trabajo de campo con la toma de fotografías y el trabajo de gabinete con la modelización de la obra es necesario reflejar la información de forma que sea útil a los objetivos marcados.

La ficha deberá contener información con:

- Identificación de la obra de fábrica.
- Mapa de situación
- Datos de localización.
- Características geométricas con croquis acotado.
- Características constructivas
- Datos extraídos de la caracterización geométrica
- Datos necesarios para la modelización hidráulica

La ficha pretende servir como hoja de inventario, de forma que podrá recoger información del trabajo de campo, del trabajo de gabinete.

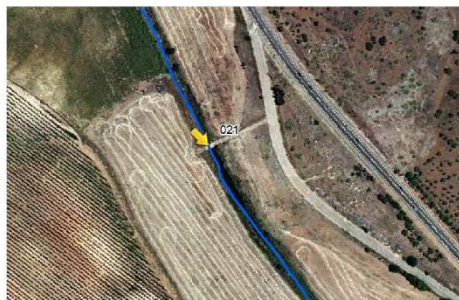
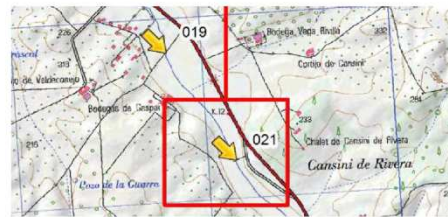
Rivillas 021

Fecha: 08/03/2012

Identificación: 021

Estado: En uso
Uso: Paso de vehículos y personas
Titular: Particular

Cauce: Rivillas
Carretera: Camino Particular
Municipio: Badajoz
Coordenadas UTM ETRS89 H29: 685155; 4296047
Cota Ortométrica Tablero: 209,22 m
Acceso: Ctra Badajoz-Sevilla (N-432) Km. 12,5. Tramo de camino al que se accede desde un tramo de vía muerta



CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS:

Tipología:

Material construcción: Hormigón Armado

Número de Vanos: 6

Altura sobre el cauce: 1,65m.

Lóngitud Total: 10,20m.

Pendiente talud Ag. Arriba H/V: 0/0

Vegetación / Acumulación de materiales: Existe vegetación no leñosa aguas arriba. No afecta a la capacidad de desagüe

Pendiente talud Ag. Abajo H/V: 0/0

Anchura: 4,00m.

Pretil: Carece

Estado de conservación: Bueno

Estado capacidad de desagüe: Bueno



OBSERVACIONES:

Tomas Fotográficas: IMG_8216, IMG_8217, IMG_8218, IMG_8219

CONCLUSIONES SOBRE METODOLOGÍA

Durante esta fase inicial desarrollada sobre el Arroyo Calamón se ha analizado diferentes alternativas de software para la modelización de las obras de fábrica mediante técnicas fotogramétricas, se han analizado dos modelos de cámaras fotográficas, la necesidad o no de calibración de estas, las necesidades para la modelización hidráulica con HEC-RAS, los modelos digitales necesarios para llevar a cabo la modelización, las diferentes fuentes de datos para estos modelos, permitiendo los análisis anteriores llegar a conclusiones claras sobre el diseño de la toma de datos y el procesado en gabinete que garanticen la consecución de los objetivos. Estas conclusiones serán puestas en práctica en la modelización del Río Rivillas.

De forma esquemática se resumen las siguientes conclusiones extraídas de los análisis preliminares:

- Agisoft PhotoScan es un software adecuado y rápido para la modelización de obras de fábrica o cualquier otra estructura con precisión suficiente.
- Es fundamental contar con una cámara de altas prestaciones, siendo muy valorable la capacidad de contar con focales pequeñas sin llegar a grandes angulares que distorsionen las imágenes. Una alta resolución ayuda y no penaliza en exceso el cálculo. No es imprescindible la calibración de la cámara.
- Si bien no han sido analizadas otras aplicaciones para la modelización hidráulica, HEC-RAS y HEC-GeoRAS facilitan en gran manera el trabajo de definición geométrica de los elementos necesarios en la modelización al permitir la integración de HEC-GeoRAS con ArcGIS.
- Los modelos digitales extraídos a partir de datos LIDAR tienen mayor resolución y precisión que los modelos obtenidos a partir de MATCHING, sobre todo cuando se pretende llegar a modelos de paso de malla bajos.
- Los modelos digitales LIDAR no son perfectos y necesitan de mucho trabajo de procesado. No son la panacea y no podrán sustituir el trabajo de campo, si bien lo complementan de forma extraordinaria. Es fundamental eliminar la influencia de la vegetación en modelos para modelización hidráulica.

FASE OPERATIVA. RIVILLAS

Los diferentes procesos a realizar combinan técnicas propias de los Sistemas de Información Geográfica, Modelización Hidráulica y Fotogrametría. Estas han sido analizadas y descritas anteriormente, partiendo en la fase operativa de algunos productos y análisis realizados anteriormente.

Siguiendo un orden basado en la cronología del desarrollo de trabajo presentamos los diferentes puntos de la fase operativa.

MODELOS DIGITALES E INFORMACIÓN PREVIA PARA MODELIZACIÓN HIDRÁULICA

En apartados anteriores se explican los modelos que se han generado para la modelización de la zona de trabajo. Los resumimos en:

- Modelo Digital del Terreno (MDT) a partir de datos LIDAR clasificados. Se ha generado a partir de los puntos de la clase suelo desnudo. Resolución espacial 2m. Se encuentra en formato GRID de ArcGIS
- TIN a partir de puntos LIDAR clasificados. Se ha generado a partir de los puntos de la clase suelo desnudo. Resolución máxima 1,4 puntos por m². Se encuentra en formato TERRAIN de ArcGIS
- Modelo Digital de Superficie (MDS) a partir de la totalidad de los datos LIDAR. Resolución media de 1,4 puntos por m². No materializado en ningún formato y consultado directamente sobre software de visualización de datos LIDAR.
- Modelo Digital del Terreno procedente de datos del IGN capturados por estereocorrelación espacial. Resolución 5m.
- Modelo de Acumulación de Flujo, a partir del MDT LIDAR de 2m.
- Modelo de Dirección de Flujo, a partir del MDT LIDAR de 2m.
- Ortofotografías procedentes del PNOA 2007
- Ortofotografías procedentes del PNOA 2011

ELECCIÓN DE OBRAS DE FÁBRICA OBJETIVO

A partir de la ortofoto y remontando los cauces de los arroyos Rivillas y Calamón desde la ciudad Badajoz se definen las localizaciones a visitar sobre ortofotos

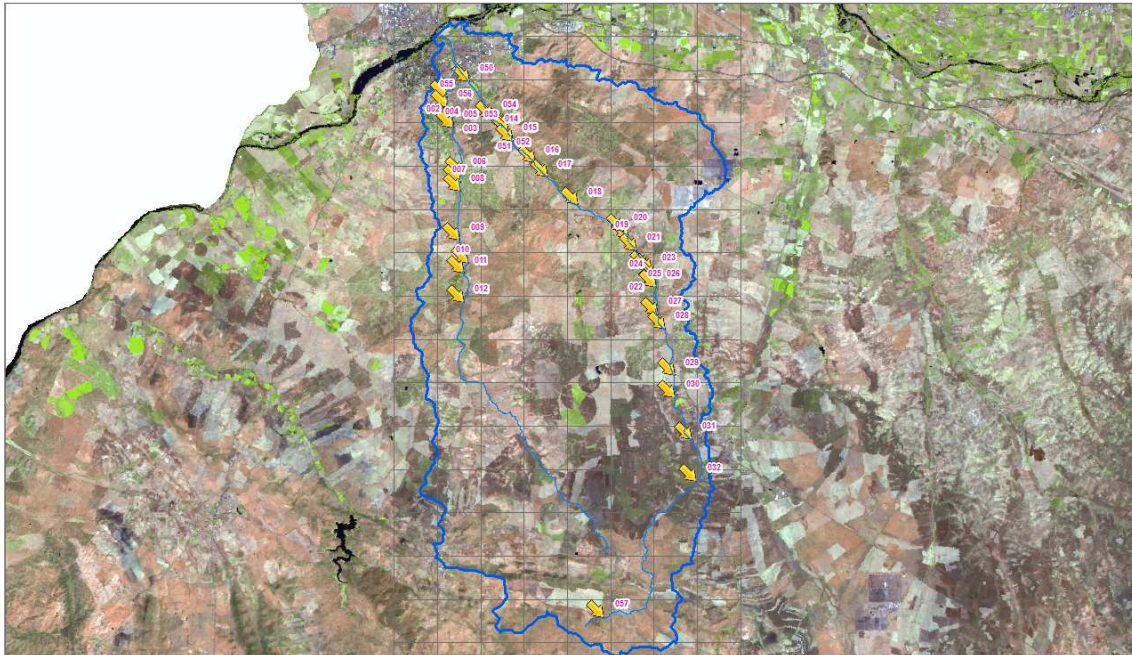
Las obras de fábricas se encuentran en los pasos de las vías sobre los arroyos presumiéndose obras de mayor magnitud en vías de mayor categoría. Las vías son en su mayoría caminos de tierra sin plataforma definida.

Dado que se hace necesario priorizar las obras de fábrica que se van a documentar se adopta el siguiente criterio:

- Se dará prioridad a las obras cuanto más cerca se encuentren de la ciudad de Badajoz y por tanto mayor sea el caudal circulante que deban soportar. Mayor distancia a la cabecera de la cuenca de estudio.
- Para las obras más alejadas de la ciudad y en tramos de cabecera de la cuenca se levantarán únicamente y cuando sean significativas, las obras de fábrica sobre carreteras o pistas de dimensiones mayores.

Se crea una capa de puntos identificando cada presumible obra de fábrica a visitar.

Para identificar las estructuras objeto de levantamiento se ha generado un proyecto de ArcMAP. Sobre este ha cargado el WMS del PNOA, el WMS del MTN25 y se ha creado una capa de puntos.



Se ha recorrido los cauces desde la confluencia en Badajoz de ambos, hasta su nacimiento identificando todos los pasos sobre las ortofotos y generando una salida gráfica con la ubicación de cada uno, tal y como se puede observar en el anexo de localización y definición de las obras de fábrica.

La numeración dada en la localización preliminar servirá de referencia para identificar las obras de fábrica.

Finalizado el proceso de localización se ha generado un fichero KML. En el Anexo pueden verse las localizaciones de los lugares identificados.

Como ayuda para la navegación e identificación en campo de las diferentes localizaciones se ha utilizado el programa OruxMaps sobre sistema operativo Android. En este se ha cargado las ortofotos, previamente descargadas con el propio programa desde el WMS del PNOA y se ha superpuesto el fichero KML.

El programa tiene herramientas validas para la navegación y que permiten llegar a las localizaciones fácilmente.

TOMA DE DATOS

La toma de datos se ha realizado en diferentes épocas del año. Algunas de las obras de fábrica no han podido ser visitadas por presentarse dificultades en el acceso. La mayoría de las obras son particulares y en algunas ocasiones el acceso no es posible.

A continuación se presenta una tabla resumen donde se relacionan las obras de fábrica, las tomas fotográficas, la cámara con la que fueron realizadas y las observaciones (fueron modelizado o no con PhotoScan).

Cauce	Nº Obra de Fábrica	Tomas Fotográficas	Cámara	Observaciones
Calamón	000	100_6177, 100_6178	Kodak Z712IS	No se modeliza. Se disponen de los planos del puente.
Calamón	001	100_6178, 100_6179, 100_6180, 100_6181, 100_6182, 100_6183, 100_6184, 100_6185, 100_6186, 100_6187, 100_6188, 100_6189	Kodak Z712IS	No se modeliza
Calamón	002	100_6190, 100_6191, 100_6192, 100_6193, 100_6194, 100_6195, 100_6196, 100_6197, 100_6198, 100_6199, 100_6200, 100_6201, 100_6202, 100_6203, 100_6204, 100_6205, 100_6206, 100_6207, 100_6208, 100_6209, 100_6366, 100_6367, 100_6368, 100_6369, 100_6370, 100_6371, 100_6372, 100_6373, 100_6374, 100_6375, 100_6376, 100_6377, 100_6378, 100_6379, 100_6380, 100_6381, 100_6382, 100_6383	Kodak Z712IS	Modelizado. Utilizada para realizar pruebas iniciales con diferentes software. Se han realizado tomas en dos épocas diferentes.
Calamón	003	100_6210, 100_6211, 100_6212, 100_6213, 100_6214, 100_6215, 100_6216, 100_6217, 100_6218, 100_6219, 100_6220, 100_6221, 100_6222, 100_6223, 100_6224, 100_6225, 100_6226, 100_6227, 100_6228	Kodak Z712IS	Modelizado
Calamón	004	100_6233, 100_6234, 100_6235, 100_6236, 100_6237, 100_6238, 100_6239, 100_6240, 100_6241, 100_6242, 100_6243, 100_6244, 100_6245, 100_6246, 100_6247, 100_6248, 100_6249, 100_6250, 100_6251, 100_6252	Kodak Z712IS	Modelizado
Calamón	005	100_6356, 100_6357, 100_6358, 100_6359, 100_6360, 100_6361, 100_6362, 100_6363, 100_6364	Kodak Z712IS	No Modelizado
Calamón	006	100_6342, 100_6343,	Kodak Z712IS	Modelizado. Estación de Aforo CHG

Cauce	Nº Obra de Fábrica	Tomas Fotográficas	Cámara	Observaciones
		100_6344, 100_6345, 100_6346, 100_6347, 100_6348, 100_6349, 100_6350, 100_6351, 100_6352, 100_6353, 100_6354, 100_6355		
Calamón	007	100_6334, 100_6335, 100_6336, 100_6337, 100_6338, 100_6339, 100_6340, 100_6341	Kodak Z712IS	Modelizado. Puente en urbanización Dehesilla del Calamón
Calamón	008	100_6303, 100_6304, 100_6305, 100_6306, 100_6307, 100_6308, 100_6309, 100_6310, 100_6311, 100_6312, 100_6313, 100_6314, 100_6315, 100_6316, 100_6317, 100_6318, 100_6319, 100_6320, 100_6321, 100_6322, 100_6323, 100_6324, 100_6325, 100_6326, 100_6327, 100_6328, 100_6329, 100_6330, 100_6331, 100_6332, 100_6333	Kodak Z712IS	No Modelizado. Mala geometría en la captura
Calamón	009	100_6294, 100_6295, 100_6296, 100_6297, 100_6298, 100_6299, 100_6300, 100_6301, 100_6302	Kodak Z712IS	Modelizado
Calamón	010	100_6274, 100_6275, 100_6276, 100_6277, 100_6278, 100_6279, 100_6280, 100_6281, 100_6282, 100_6283, 100_6284, 100_6285, 100_6286, 100_6287, 100_6288, 100_6289, 100_6290, 100_6291, 100_6292, 100_6293	Kodak Z712IS	Modelizado
Calamón	010			No accesible
Calamón	011			No accesible
Rivillas	017	IMG_8204, IMG_8205, IMG_8206,	CANON EOS550D	Modelizado
Rivillas	018	IMG_8207, IMG_8208, IMG_8209	CANON EOS550D	Modelizado
Rivillas	019	IMG_8214, IMG_8215	CANON EOS550D	No Modelizado. Rodeado por vegetación tanto aguas arriba como aguas abajo.
Rivillas	020	IMG_8210, IMG_8211, IMG_8212, IMG_8213	CANON EOS550D	Modelizado
Rivillas	021	IMG_8216, IMG_8217,	CANON	Modelizado

Cauce	Nº Obra de Fábrica	Tomas Fotográficas	Cámara	Observaciones
		IMG_8218, IMG_8219	EOS550D	
Rivillas	022	IMG_8220, IMG_8221, IMG_8222	CANON EOS550D	Modelizado
Rivillas	024	IMG_8223, IMG_8224, IMG_8225	CANON EOS550D	No Modelizado. Rodeado por vegetación tanto aguas arriba como aguas abajo.
Rivillas	025	IMG_8226, IMG_8227, IMG_8228, IMG_8229	CANON EOS550D	Modelizado
Rivillas	026	IMG_8230, IMG_8231, IMG_8232, IMG_8233	CANON EOS550D	No Modelizado. Badén
Rivillas	027	IMG_8236	CANON EOS550D	No Modelizado. Badén
Rivillas	028	IMG_8237, IMG_8238	CANON EOS550D	No Modelizado. Rodeado por vegetación tanto aguas arriba como aguas abajo.
Rivillas	029	IMG_8239, IMG_8240, IMG_8241, IMG_8242	CANON EOS550D	No Modelizado. Imposible realizar un número de tomas suficientes
Rivillas	031	IMG_8243, IMG_8244, IMG_8245, IMG_8246, IMG_8247	CANON EOS550D	Modelizado
Rivillas	050	IMG_8346	CANON EOS550D	No Modelizado.
Rivillas	051	IMG_8356, IMG_8357, IMG_8358, IMG_8359	CANON EOS550D	No Modelizado.
Rivillas	052	IMG_8360, IMG_8361, IMG_8362, IMG_8364, IMG_8365	CANON EOS550D	No Modelizado.
Rivillas	053	IMG_8366, IMG_8367, IMG_8368, IMG_8369	CANON EOS550D	No Modelizado.
Rivillas	054	IMG_8347, IMG_8348, IMG_8349, IMG_8350, IMG_8351, IMG_8352, IMG_8353, IMG_8354	CANON EOS550D	No Modelizado.

En el anexo se pueden ver cada una de las tomas fotográficas junto con la ficha de las obras de fábrica del Rivillas.

Las fotografías pueden ser consultadas en el Anexo digital que acompaña al presente trabajo.

TRATAMIENTO Y MODELIZACIÓN DE OBRAS DE FÁBRICA

Una vez realizadas las tomas comienza el trabajo de gabinete. En primer lugar se descargan las fotografías y se ordenan en un directorio por cada obra de fábrica.

Con el programa PhotoScan se sigue el procedimiento descrito en el apartado dedicado al análisis de software fotogramétrico. Se puede resumir en los siguientes pasos:

1. **Carga de imágenes.**
2. **Definición de parámetros.**
 - a. Calibración de las tomas

- b. Filtrado de imágenes por máscara
3. **Alineación de las imágenes:**
4. **Construcción de la Geometría.**
5. **Sistema de Coordenadas del modelo.**
6. Toma de Medidas

En el Anexo se muestran imágenes del proceso. En el Anexo Digital pueden encontrarse los ficheros de proyecto de modelado.

Las obras de fábrica objetivo son aquellas que se encuentran fuera de la parte encauzada en la confluencia de los cauces en la ciudad de Badajoz. A partir de la zona encauzada hay varios puentes de los que se dispone de los ficheros CAD de alzado.

INVENTARIO DE LAS OBRAS DE FÁBRICA

Este queda recogido en el anexo con los siguientes datos:

- Situación.
- Ficha / Croquis.
- Tomas Fotográficas
- Modelo geométrico de la estructura con PhotoScan.
- Modelización en HEC-RAS.

MODELIZACIÓN HIDRÁULICA

Para la modelización hidráulica se siguen los pasos descritos en la fase de análisis de alternativas. Resumiendo, comentar, que se utilizará el software de modelización unidimensional HEC RAS con su extensión para ArcGIS, HEC-GeoRAS.

ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA ZONA DE ESTUDIO

Tendremos en cuenta las siguientes consideraciones para realizar un somero análisis preliminar:

- Observación de la extensión de las inundaciones en el pasado y de estudios existentes.

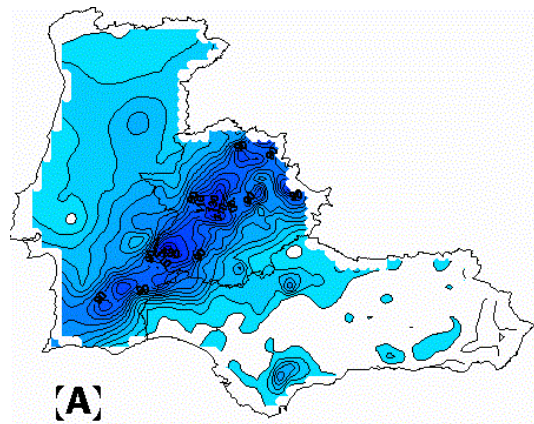
La recopilación de esta información está fuera del alcance del presente trabajo, no obstante, es de especial sensibilidad este aspecto y uno de los motivos de centrar el estudio en este lugar debido a las inundaciones producidas en noviembre de 1997.

A continuación se reproducen algunos fragmentos de los siguientes trabajos:

“Influencia antrópica en la avenida de 1997 en el río Rivillas (Badajoz). Cambios de usos e impacto geomórfico”

J.A. Ortega Becerril, M.G. Garzón Heydt

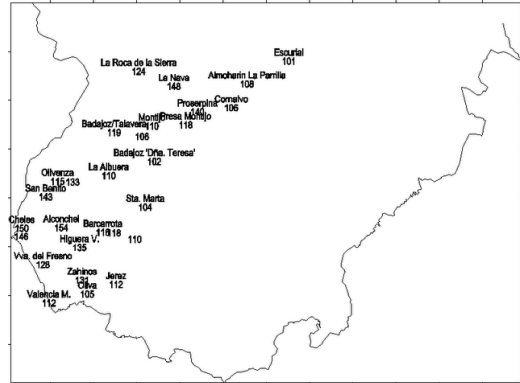
Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid



“14 aniversario de la riada de Badajoz” <http://meteo-badajoz.blogspot.com.es/2011/11/14-aniversario-de-la-riada-de-badajoz.html>

Javier Piñero F. Autor del blog de observación meteorológica: <http://meteo-badajoz.blogspot.com.es> donde se recopila fotografías e información sobre la riada.

El temporal que cruzó la península Ibérica el 5 de noviembre de 1997 dejó lluvias fuertes en el suroeste de Portugal y Extremadura que fueron calificadas como extraordinarias por el INM (1998), dejando valores de precipitación diaria excepcionales para la zona, entre 110 y 150 mm/día, superando en casi todos los casos las efemérides de cada estación (considerado de 500 años de periodo de retorno), pero estos valores no son por si solos capaces de explicar una crecida de semejante magnitud. Las lluvias en los días previos, cerca de 84mm, son suficientes para alcanzar el umbral de escorrentía y evitar la infiltración.



Badajoz ha tenido asentamientos de la Edad del Bronce (3000 BC), con restos posteriores celtas, romanos y visigodos (Fraile, 1995). Estos pueblos habitaron en el Cerro de La Muela, pero sin llegar a ser ciudad, título que alcanza en el siglo IX, ya en época musulmana. Badajoz vive de espaldas al río, utilizándolo solo como defensa y para obtener agua. A partir de este momento los sucesivos pobladores de Badajoz viven en una ciudad intramuros, que no se desarrollará hasta pasada los años 40 del siglo XX. Crecidas de gran magnitud, como la de diciembre de 1876, con marcas históricas a más de un metro por encima de la de 1997, ver imágenes, apenas causaron víctimas ni daños materiales, pues no existía población sobre las márgenes del río Rivillas. A partir de 1939 se crean los barrios de San Roque y Cerro de Reyes, ocupando parte de la llanura de inundación del Rivillas y Calamón, y el entorno urbano crece cuenca arriba, facilitado por la carretera de Sevilla. Se transforma gran parte de la cuenca media y baja, con cambios de cultivos y usos tradicionales, en el paisaje urbano y en el entorno fluvial.





Situación de la placa con la altura de la riada de 1876. Al fondo el río Guadiana.

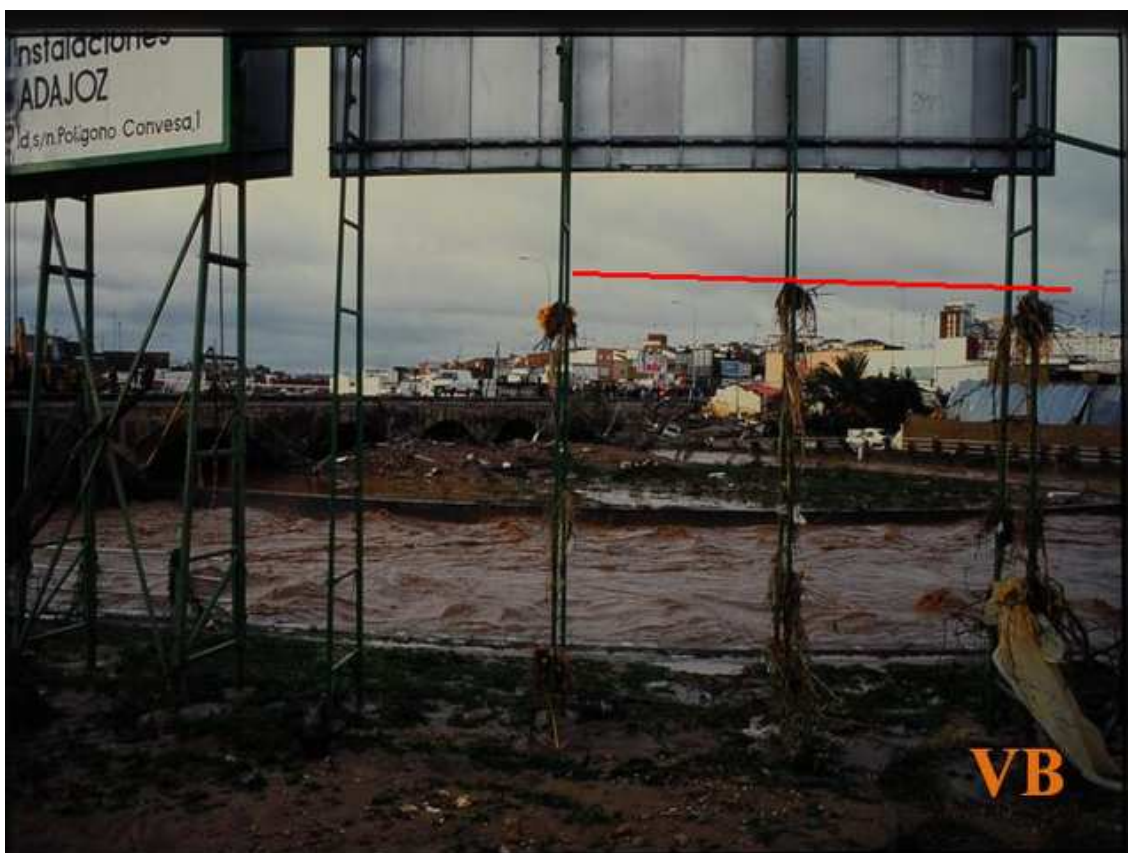
Los cambios más significativos en la llanura y canal fluvial son: destrucción de la red secundaria de cauces, que quedan enterrados para facilitar las labores en los campos (Fig.1), creación de motas o malecones, arado paralelo a la dirección del flujo, retirada de la vegetación de ribera para ganar espacio para el cultivo y sobre todo, con consecuencias importantes en el impacto geomórfico, la rectificación del cauce principal, con pérdida de sinuosidad, que en 1956 era de 1.32 hasta llegar a 1.06 en el momento de la crecida.

En la avenida de 1997 los valores de duración del pico de la crecida fueron de $79,2 \times 10^3$ s. y los cambios geomórficos fueron elevados con valores de la potencia fluvial máxima de $923,6 \text{ W.m}^{-2}$. Su fuerte impacto, no se debe tanto al caudal máximo de la crecida, como a su duración, y a hidrograma de forma ancha, en meseta que mantiene un elevado caudal durante dos o tres horas, favorable para tener valores de energía unitaria alta ($22.600 \text{ J} \times 10^3$). A esto se superpone el incremento de la carga sólida originada por las transformaciones de uso del suelo, así como las rectificaciones y presencia de motas erosionables en el cauce. El caudal que llegó a la ciudad de Badajoz lo cifran algunos modelos en $799 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

A continuación se muestran algunas imágenes del estado de las conducciones y de las consecuencias de la riada.







Estado actual de la zona:





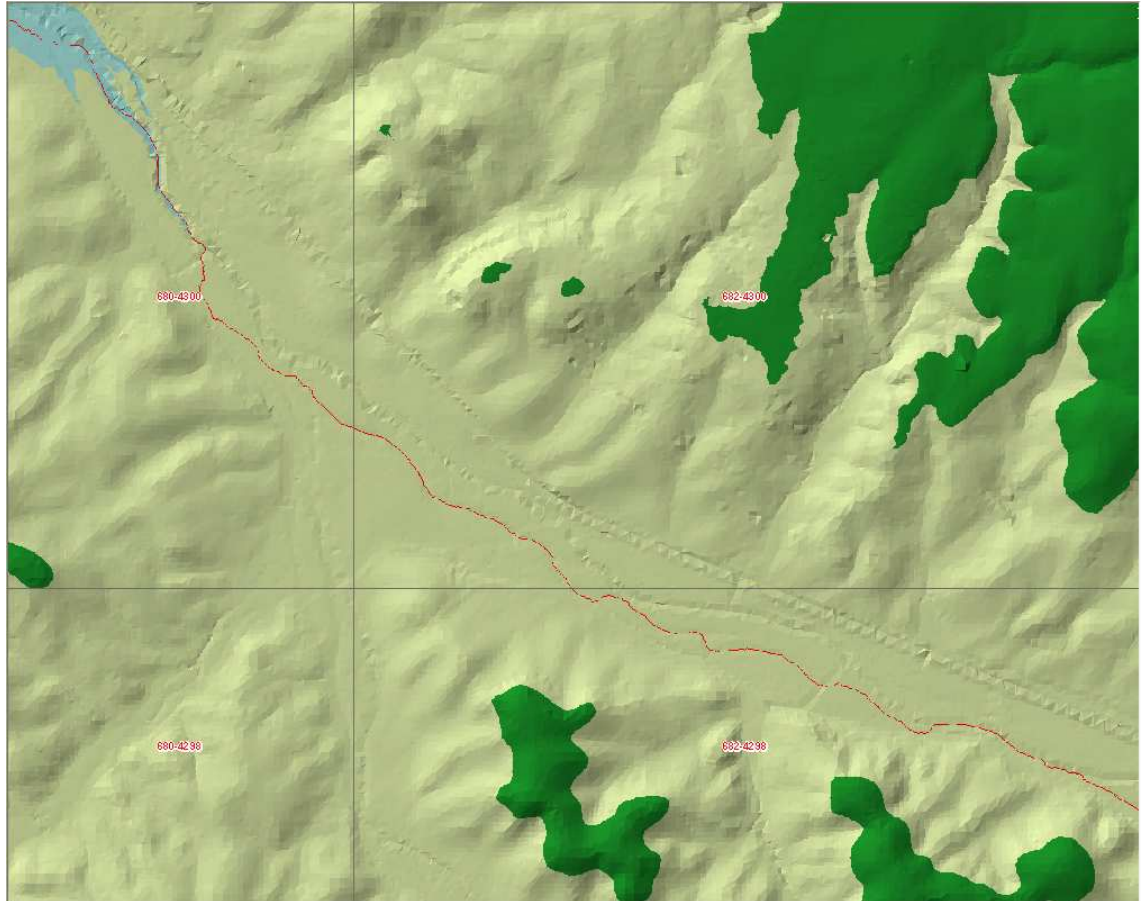
- Observación de la geomorfología en planta. (sobre ortofoto y a partir del MDT)

Tal y como se describe en apartados anteriores se han realizado modelos digitales para realizar un estudio preliminar de la zona de estudio.

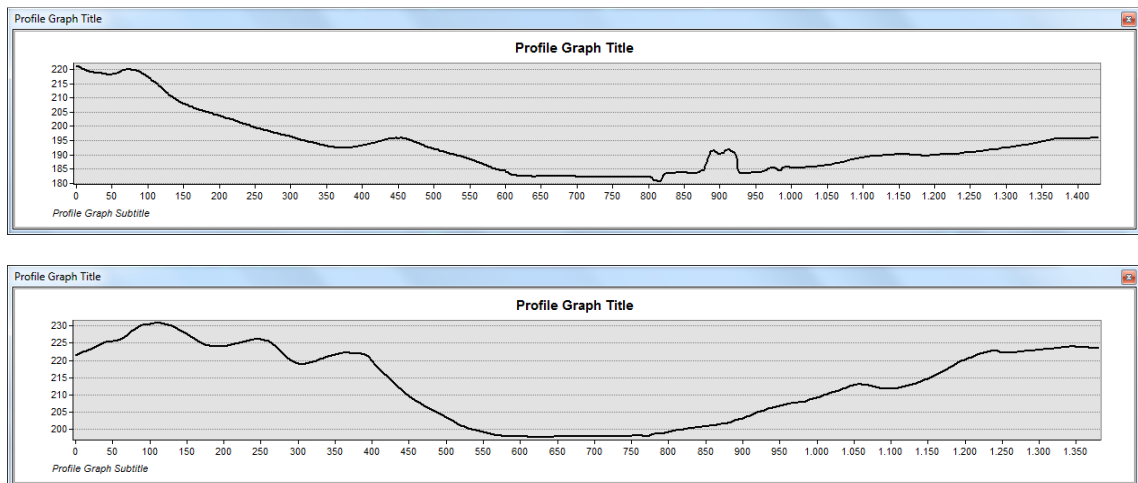


Se han generado modelos de acumulación de flujo que permiten conocer el discurrir natural del cauce, más allá de los encauzamientos realizados por excavación del terreno. Se pueden apreciar en rojo, distinguiéndose del cauce actual visible en la ortofoto.





- Análisis de secciones transversales.



Considerando los apartados anteriores se llega a las siguientes consideraciones a tener en cuenta para la modelización del cauce:

- Es preciso modelar las obras de fábrica y puentes para determinar las zonas de flujo inefectivo asociadas.
- Incorporar las canalizaciones en la zona próxima a Badajoz.
- Perfiles generosos a ambos lados del cauce que recojan todo el valle. Se decide 400 metros a cada lado del eje del cauce.

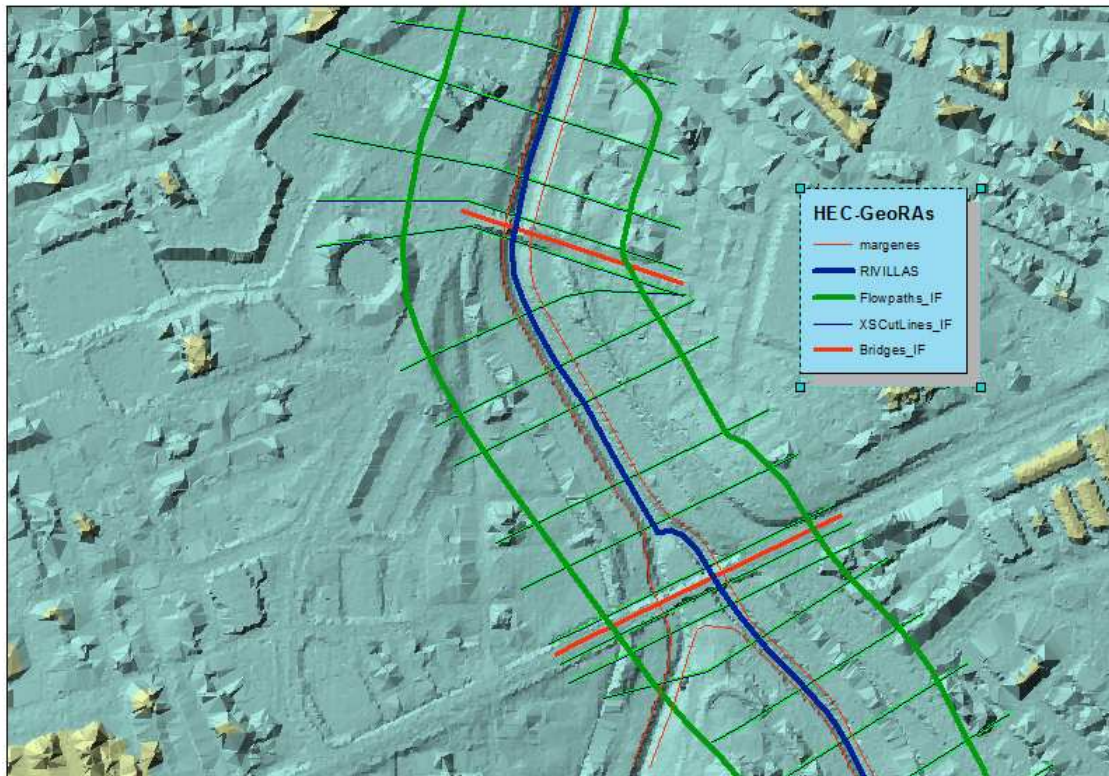
- No hay zonas de ensanchamiento y estrechamientos bruscos.
- No hay zonas de cambio de pendiente brusca.
- No se observan zonas de almacenamiento
- Dado que es un estudio preliminar se decide una distancia entre perfiles nunca mayor a 50m. estando la media en torno a 60m.
- Las líneas de lujo se eligen de forma que contengan en su mayor parte la máxima lámina de inundación previsible en vista a los estudios anteriores. Se dispone que sea de 150m. a cada lado del cauce.

PREPARACIÓN DE LA GEOMETRÍA BÁSICA EN HEC-GEORAS

Como se ha desarrollado en el apartado anterior dedicado al análisis se procede a la preparación de la geometría básica en HEC-GeoRAS.

1. Identificación del eje de los ríos. Definición de tramos.

Se digitaliza la línea del eje del río a partir del TIN del MDE procedente del LIDAR y de la ortofoto, dando preferencia a la geometría definida por el TIN LIDAR.



2. Identificación de las márgenes del río.

Al igual que con el cauce se digitalizan las márgenes a partir de la interpretación del MDT y de la Ortofotografía.

3. Identificación de las líneas de flujo laterales.

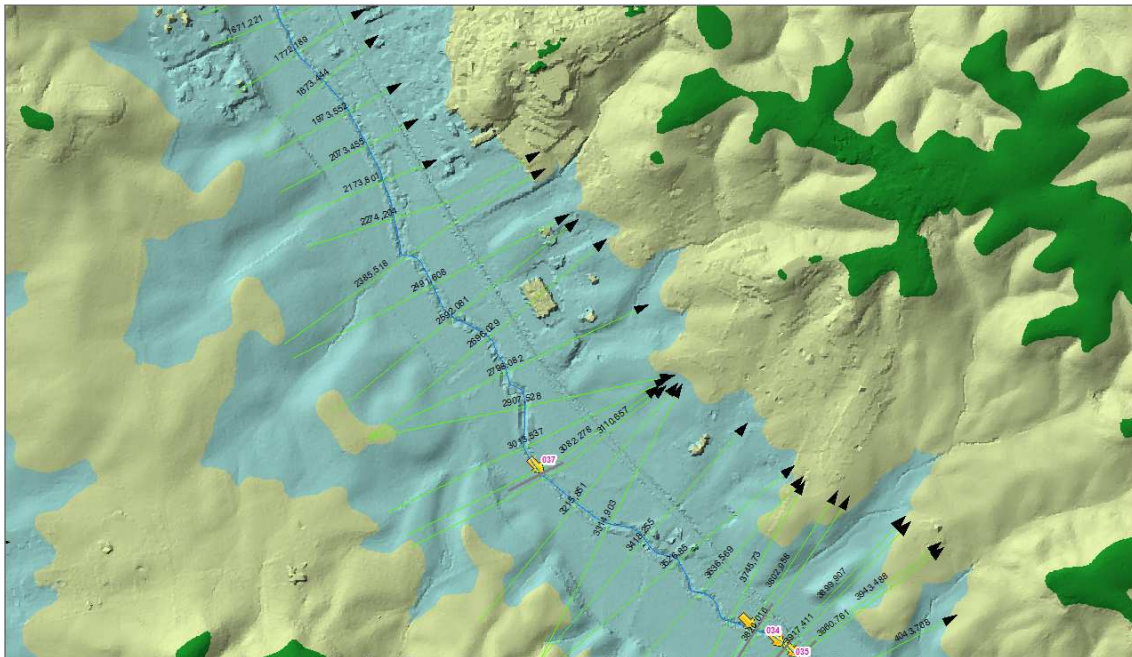
Se escoge una distancia media para la zona inundable. Se estima esta en 150m. y se genera a partir de una paralela al cauce principal.

4. Incorporación de puentes y obras de fábrica.

Se señala la situación de cada una de las obras de fábrica que a priori van a ser digitalizadas.

5. Distancia entre secciones transversales al cauce.

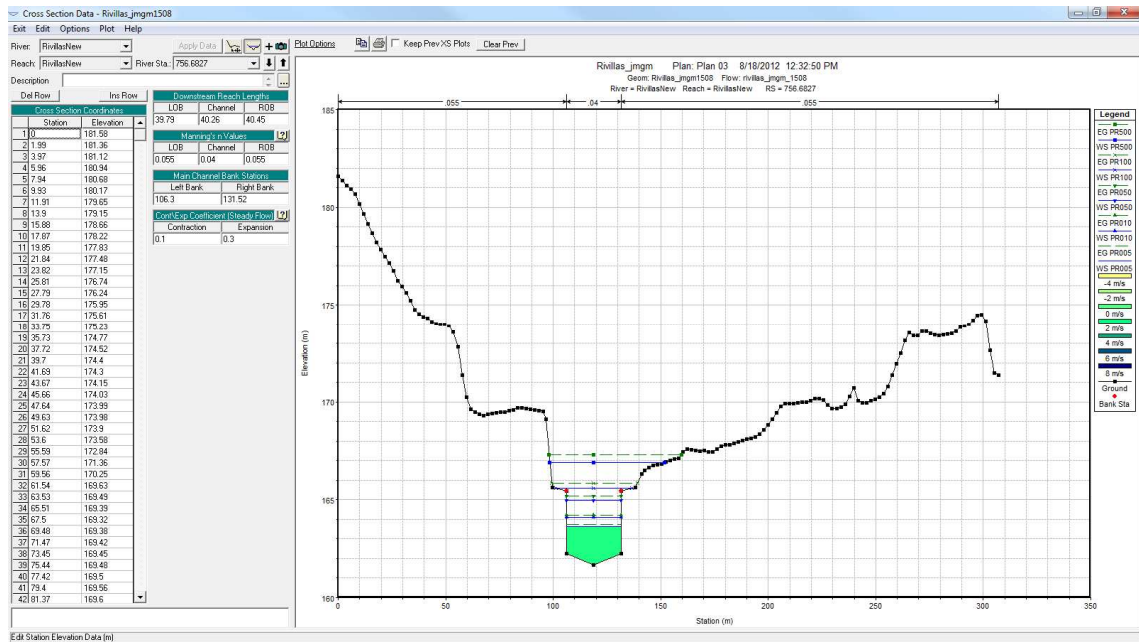
Se define una distancia media de unos 60m. con distancia máxima de 80m., ya que estamos considerando un estudio preliminar. Estudios de mayor detalle requerirían de mayor cantidad de perfiles que aumenten la resolución del modelo. Los perfiles se definen de forma perpendicular al cauce, pero considerando que deben guardar esta relación transversal con la zona de inundación, es decir, en ocasiones y si nos atenemos a la dirección en un punto del cauce, la prolongación de las secciones perpendiculares a este pueden no definir correctamente la sección de la zona de inundación. En este caso es necesario quebrar las líneas.



IMPORTACIÓN DE LA GEOMETRÍA BÁSICA A HEC-RAS ADICIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES ADICIONALES.

Este apartado ha sido descrito en la fase de análisis, centrándonos en la elección de variables y condiciones para los diferentes elementos.

1. Creamos un proyecto nuevo, por ejemplo: Rivillas_jmgm
2. Introducimos los datos geométricos exportados desde HEC Geo-RAS
3. Se revisa los perfiles transversales uno por uno, de forma que no se presenten errores.



- a. En el caso de que se existan zonas encauzadas con una sección definida se corregirá el perfil de acuerdo a los datos de la sección.

En este caso se ha optado en definir la sección con la ayuda de una hoja Excel para todas las secciones encauzadas. En la zona de estudio se han identificado dos secciones diferentes, una de 25m. de ancho para la zona comprendida entre la confluencia del Rivillas y Calamón hasta la desembocadura en el Río Guadiana y otra, de 15m. de anchura, aguas arriba del punto indicado en el Rivillas hasta la embocadura de esta en el perfil 2770,53.

La operativa ha sido identificar sobre el perfil dado por los datos LIDAR el punto de intersección de los taludes del canal de aguas bajas que definen la sección. Obtenida la distancia al origen en el perfil y la cota se realizan operaciones de suma y resta de abscisas y ordenadas, quedando definida la sección sobre el perfil anterior. Por último se edita el perfil corrigiendo los “picos” que puedan mostrarse.

Se muestra el cálculo en la correspondiente hoja Excel, donde en la primera columna y primer fila tenemos el número del perfil, X (distancia al origen del perfil), Cota. A partir de la segunda fila, la cuarta y quinta columna muestran la diferencia en abscisas y ordenadas que define la sección.

1685,136	129	163,86	Sección 1	
	106,64	171,32	-22,36	7,46
	109,6	167,82	-19,4	3,96
	116,39	167,64	-12,61	3,78
	116,39	164,45	-12,61	0,59
	129	163,86	0	0
	141,61	164,45	12,61	0,59
	141,61	167,64	12,61	3,78
	148,4	167,82	19,4	3,96
	151,36	171,32	22,36	7,46
1884,508	154,57	164,91	Sección 2	
	146,92	168,89	-7,65	3,98
	147,73	166,59	-6,84	1,68

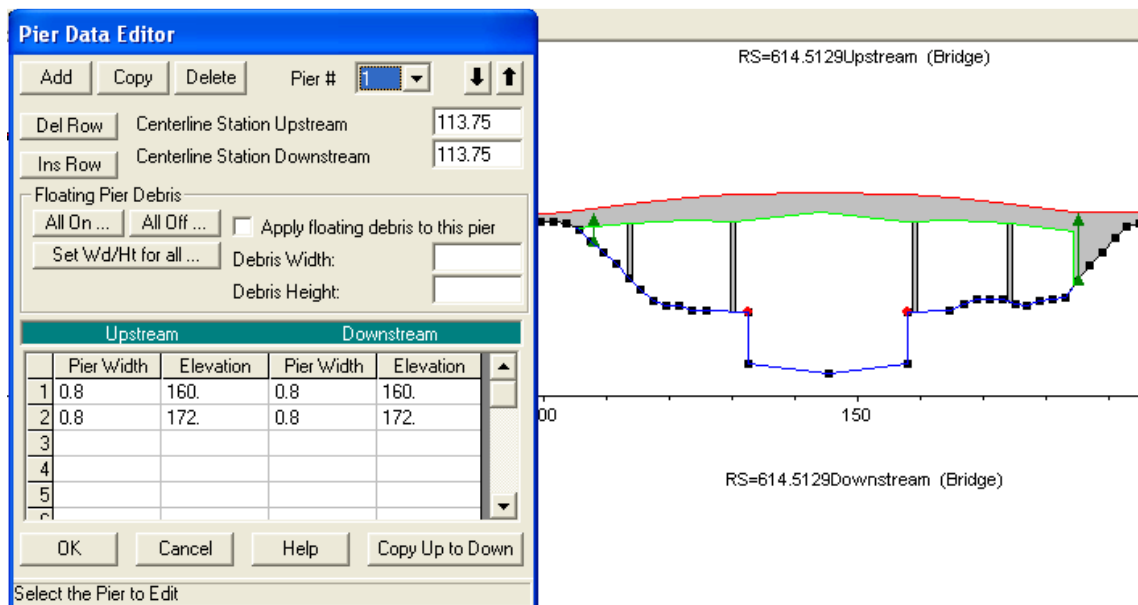
150,77	166,24	-3,8	1,33
150,92	165,08	-3,65	0,17
154,57	164,91	0	0
158,22	165,08	3,65	0,17
158,37	166,24	3,8	1,33
161,41	166,59	6,84	1,68
162,22	168,89	7,65	3,98

4. Ajuste de los puntos de margen
5. Definición de Puentes (Bridges) y Obras de fábrica (Culvert)

En primer lugar llevaremos a cabo una comprobación de la existencia de perfiles de referencia aguas arriba y aguas abajo de los bridges y culvert.

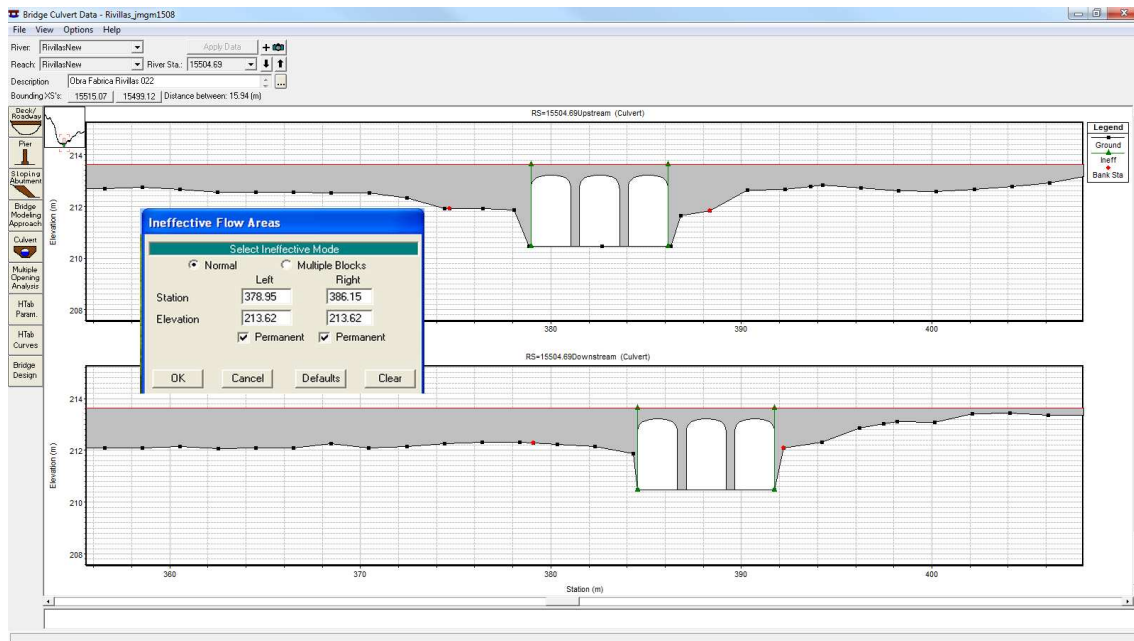
Con la ayuda de las fichas de las obras de fábrica procedemos a modelizar cada una de las obras según la geometría y los coeficientes estimados según la documentación.

En el anexo se presenta para cada obra de fábrica o puente los parámetros con los que se ha modelizado.



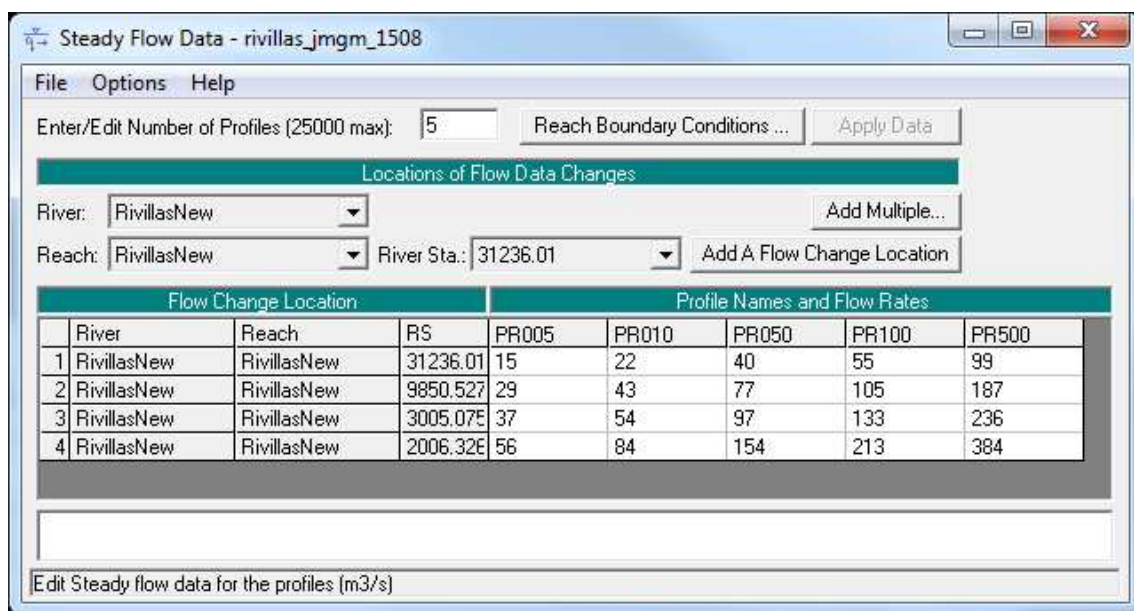
6. Definición de las zonas de flujo no eficiente.

Estas zonas se definen en los límites de la apertura del culvert dentro de la obra de paso.



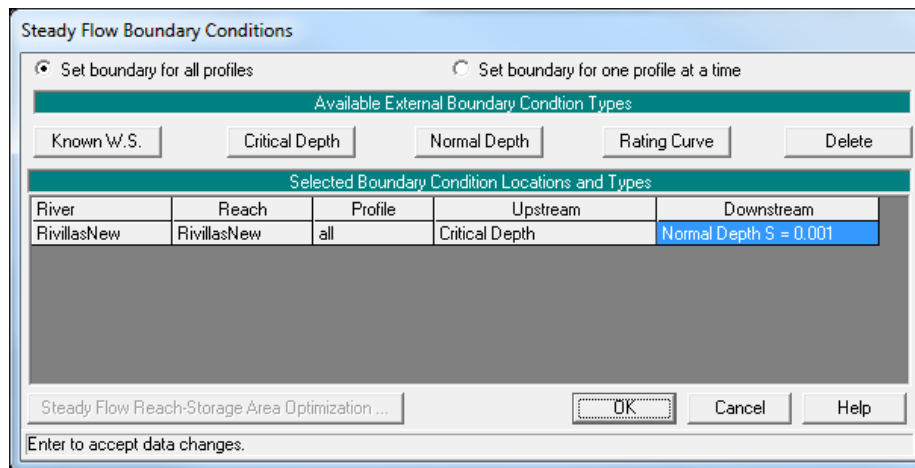
CAUDALES Y CONDICIONES DE CONTORNO

Los tramos se definen a partir de la observación de los principales afluentes. Para los valores de caudal se utiliza la herramienta CAUMAX del CEDEX.



En nuestro caso, hemos indicado 4 perfiles para los periodos de retorno de 5, 10, 50, 100 y 500 años. Los caudales han sido obtenidos a partir de los datos procedentes de la aplicación CAUMAX elaborada por el CEDEX por encargo del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

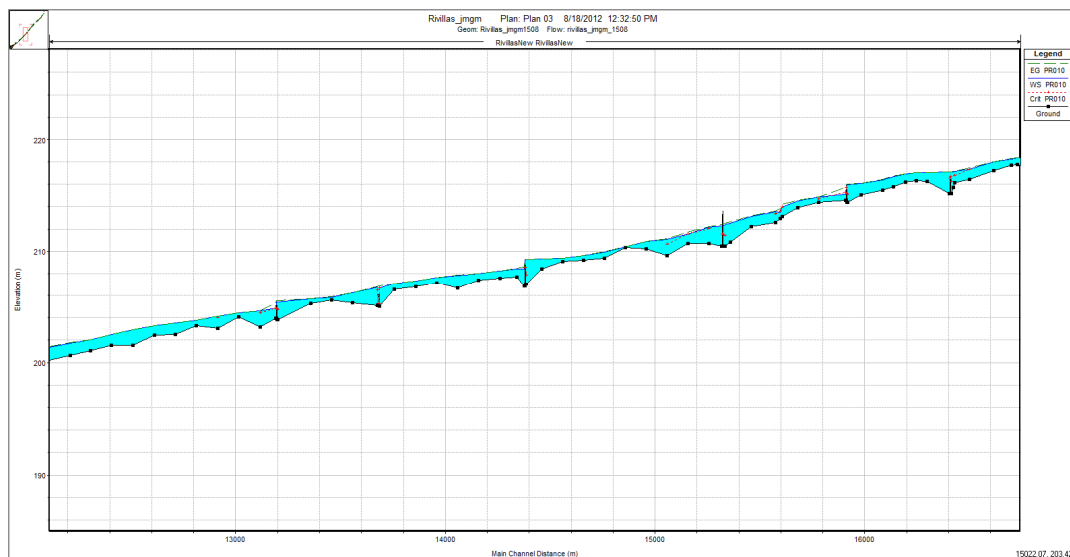
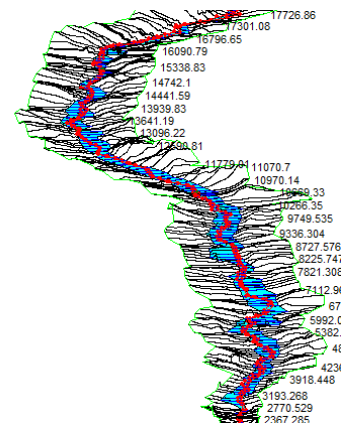
Las condiciones de contorno se establecen según la siguiente imagen.



EJECUCIÓN DEL MODELO

Como resultado final de la presente metodología se ejecuta el modelo y se observan de forma gráfica los resultados. El objetivo principal del presente trabajo es aportar una posible metodología que ayude en el inventario y definición geométrica de las obras de fábrica y la importancia que tiene en los resultados de la modelización hidráulica la incorporación de estas.

En la siguiente imagen puede observarse como las obras de fábrica elevan la lámina de agua, provocando el aumento del área de inundación.

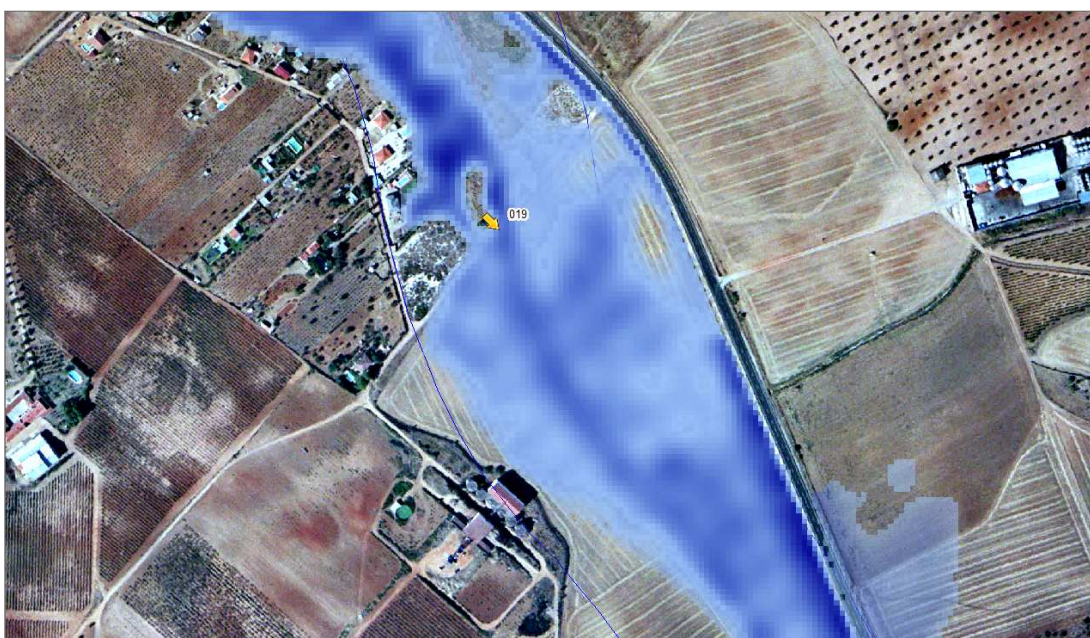


IMPORTACIÓN A ARCGIS 10 CON HEC-GEORAS

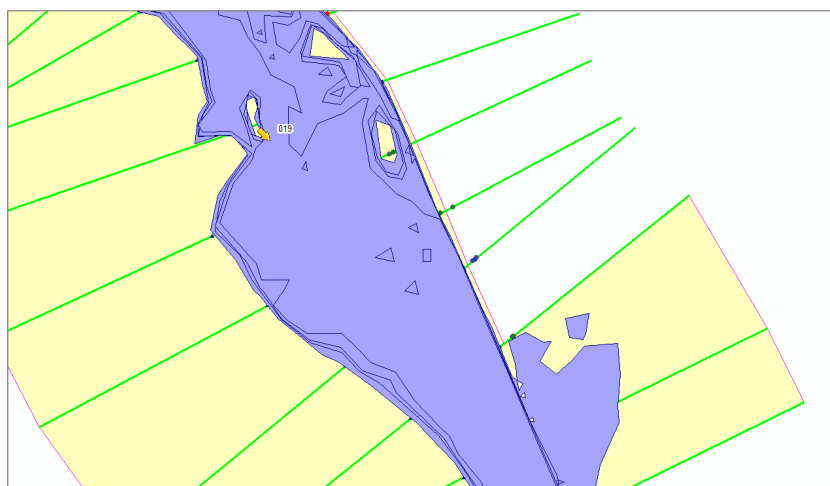
Realizamos la importación a través de las opciones de HEC-GeoRAS, obteniendo las láminas de inundación para cada plan y perfil contemplado.

Se muestra a continuación el efecto de una obra de fábrica sobre la lámina y como pueden observarse los fenómenos de contracción y expansión. Las imágenes corresponden correlativamente a los diferentes perfiles para periodo de retorno de 5, 50, 100 y 500 años





Por último representándolas en conjunto:



RESULTADOS OBTENIDOS

RESULTADOS PARCIALES

En el presente trabajo se distinguen dos fases. Una primera de análisis de las diferentes tecnologías que serán usadas y otra segunda de aplicación y ligada a la obtención de resultados según los objetivos marcadas.

Son resultados parciales, y muy importantes, las conclusiones obtenidas a lo largo de la fase de análisis. Si bien se recomienda la lectura de estos apartados en el contexto de sus contenidos, se reproducen a continuación estos.

CÁMARAS, CALIBRACIÓN Y SOFTWARE FOTOGRAMÉTRICO. CONCLUSIONES

AGISOFT PHOTOSCAN ha demostrado ser una herramienta muy potente, flexible y rápida en la obtención de resultados. Sus opciones son suficientes y es posible escalar el tiempo de cálculo en función de los resultados deseados.

Las principales dificultades derivan de la geometría de las tomas, condicionada por las propias obras de fábrica, los cauces y de la pérdida de detalle en tomas lejanas, en ocasiones obligada por la propia dimensión de la obra de fábrica.

Estos factores no pueden ser mejorados mediante opciones del software, generando dudas sobre la idoneidad de la cámara utilizada. Los problemas anteriormente referidos pueden contrarrestarse con objetivos con mayor campo (menor focal) y mayor grado de detalle, mayor resolución, de forma que pueda disminuirse el número de tomas a realizar y que la geometría de toma sea más favorable.

Por otro lado, una mayor resolución puede traducirse en problemas en el procesado por las limitaciones en la memoria.

Ante esta situación, se repite el proceso anteriormente descrito con PhotoScan con tomas realizadas con la cámara CANON, mejorando los resultados obtenidos y comprobándose que en condiciones idóneas basta con 3 tomas para alcanzar los objetivos deseados.

Por último y comparando las medidas obtenidas y los patrones de comparación se concluye que no es estrictamente necesario la calibración de las tomas, si bien es recomendable.

Resumiendo las conclusiones:

- Software aconsejado: PhotoScan
 - No es imprescindible la calibración de la cámara, para las precisiones requeridas en el presente trabajo. Basta con la autocalibración que realiza el software a partir del fichero EXIF.
 - Uso de máscaras en el proceso de alineación.
 - Tomas perpendiculares y espaciadas frente al objeto.
 - No es necesario reconstruir la geometría con gran calidad (*Medium*)
 - Se recomiendan más de 4 tomas por objeto. Un número mucho mayor de tomas no mejora los resultados.
- Cámara aconsejada (entre las opciones valoradas): CANON EOS550d
 - Tomas con focales en torno a 18mm. dan buen resultado y equilibrio entre distorsión y campo de imagen.

- Mayor resolución posible.

MODELIZACIÓN HIDRÁULICA

En el caso de la modelización hidráulica, no ha habido un análisis de alternativas como tal, siendo HEC-RAS la solución adoptada.

Para la preparación de la modelización hidráulica ha sido necesaria la obtención de ciertos productos intermedios que sirvan de base a esta con la ayuda del módulo HEC-GeorAS. Los productos intermedios han sido:

- Modelo digital del terreno.
- Digitalización de los ejes del río
- Digitalización de los márgenes del río
- Digitalización de la sección máxima de la zona inundable.
- Digitalización de zonas de vegetación.
- Digitalización de secciones donde con puentes, azudes, diques y zonas encauzadas.
- Modelos para HEC-RAS de las obras de fábrica
- Condiciones de contorno.
- Caudales.

MODELOS DIGITALES

Para permitir el análisis de la cuenca de ambos ríos y su modelización ha sido necesaria la obtención de diferentes modelos. El procedimiento para la generación de cada uno está desarrollado en puntos anteriores. A continuación se relacionan los diferentes productos:

- Mosaico MDE procedente de datos PNOA obtenidos a partir de estereocorrelación (matching).
- Mosaico Ortofotografías PNOA de la zona de estudio.
- Nube de puntos LIDAR clasificadas.
- MDE obtenidos a partir de datos LIDAR con paso de malla de 2 metros.
- Modelos de dirección de flujo.
- Modelos de Acumulación de flujo.
- Cuenca vertiente de ambos cauces.
- Red de drenaje a partir de modelos de acumulación de flujo y dirección de flujo.

TOMA DE DATOS Y TRABAJO DE GABINETE

En esta fase se ha obtenido diversos productos intermedios y necesarios, como:

- Fotografías de las obras.
- Croquis de cada obra.
- Modelo de la obra con PhotoScan
- Cota a partir de datos LIDAR del tablero de la estructura.
- Ficha con la información de cada una.

RESULTADOS FINALES

A continuación, se valoran los resultados obtenidos con los objetivos marcados.

Objetivo: Desarrollo de una metodología para la caracterización geométrica de obras de fábrica en cauces fluviales mediante técnicas fotogramétricas.

Este objetivo ha sido conseguido con éxito demostrándose la posibilidad del uso de técnicas fotogramétricas para la generación de modelos y documentación de todo tipo de estructuras. En la fase analítica sobre el Calamón y posterior fase operativa sobre el Rivillas se desarrolla el método.

Objetivo: Construcción de Modelos Digitales mejorados para cálculos hidráulicos aplicados a una cuenca.

El éxito en la consecución de este objetivo podemos considerarlo como satisfactorio, pero parcial respecto a las premisas iniciales.

Han sido generados modelos digitales de elevación a partir de datos LIDAR clasificados, eliminando en lo posible los efectos de la vegetación, pero no se han incorporado las obras de fábrica sobre estos. El motivo no es otro es la escasa utilidad de generar este modelo para la modelización hidráulica. Además el propio Modelo Digital de Superficie, no materializado en un fichero físico en el presente trabajo, pero si consultado y generado a partir de los datos LIDAR brutos ya incluye las obras de fábrica. Luego, no hay razón para la generación de este MDS parcial cuando el objetivo es realizar una modelización hidráulica final con HEC-RAS, que incorpora las obras de fábrica a través de medios propios. Estos modelos han sido materializados en HEC-RAS.

En la propuesta del proyecto se relacionaban los siguientes productos a generar:

Productos a generar: Inventario de obras de fábrica caracterizadas geométricamente en las cuencas descritas.

El inventario es consultable en el anexo adjunto a la presente memoria. El inventario es completo para las obras del Río Rivillas y parcial para el Calamón. El contenido del inventario es:

- Situación.
- Ficha / Croquis.
- Tomas Fotográficas
- Modelo geométrico de la estructura con PhotoScan.
- Modelización en HEC-RAS.

Productos a generar: Modelos digitales del terreno con las obras de fábrica incorporadas

A partir de los datos LIDAR brutos se podría confeccionar Modelos Digitales de Superficie donde aparecerían incorporadas las obras de fábrica (tablero o parte superior del terraplén). Este no ha sido generado ya que no es útil en la modelización hidráulica. No obstante, se ha generado un Modelo Digital de Elevación a partir de los datos de suelo desnudo.

Productos a generar: Análisis hidráulico de la cuenca piloto

Este ha sido generado con la aplicación HEC-RAS. Los datos utilizados para la modelización, más allá de los geométricos dados por la digitalización y MDE, son discutibles y se han generado a partir de los datos por defecto utilizados en la bibliografía. Estos datos y el modelo debieran ser revisados por un especialista en hidráulica. El fin del presente modelo es demostrar la necesidad de incorporar las obras de fábrica.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Continuando con la fase de resultados obtenidos y objetivos comprometidos, valoramos en este apartado el último punto de los 'Productos a generar'.

Productos a generar: Análisis y conclusiones sobre la metodología empleada

Dentro de la metodología desarrollada en el presente trabajo distinguimos dos partes. Aquella propia e inherente a la modelización hidráulica y que debe ser llevada a cabo en cualquier caso y otra ligada a la caracterización geométrica de las obras de fábrica, donde como novedad, se introduce la técnica fotogramétrica.

En la primera parte es la generación de Modelos Digitales de Elevación a partir de datos LIDAR el mayor aporte del presente trabajo. El aporte no está en la generación del modelo en sí, si no en cómo hacerlo a partir de los datos LIDAR que empiezan a estar disponibles por parte de las administraciones públicas.

Como podemos leer en los productos que ofrece el PNOA respecto al LIDAR: *Datos LIDAR. Modelo digital de superficies obtenido mediante sensores LIDAR, con una densidad media de 0.5 ptos/m2, con una distribución de hojas de 2x2 km. Formato de archivos LAS, con alturas elipsoidales. Los datos están sin clasificar. Sistema geodésico de referencia ETRS89 (en Canarias REGCAN95, compatible con ETRS89) y proyección UTM en el huso correspondiente a cada hoja.*

En primer lugar llama la atención que se suministre un Modelo Digital de Superficie con datos de altura elipsoidal. Como se pone de manifiesto en este trabajo en el propio ámbito de la zona de estudio tenemos ondulaciones del Geoide de 0.8m. para una longitud lineal de unos 20 km. Si bien el error en la pendiente no es significativa 0.00004, es necesario tener en cuenta las diferencias entre cota y altura elipsoidal a la hora de comparar modelos y resultados.

Tampoco se entiende muy bien que los datos se encuentren sin clasificar, pues el potencial de los datos LIDAR está en la capacidad de generar MDE por separado de los MDS.

Entendemos que estamos en una fase inicial y que se está trabajando por parte del IGN en tratar los datos LIDAR de forma que sean más usables, pero, la distribución de los datos en la situación actual puede dar lugar a errores considerables si no se tienen en cuenta las consideraciones anteriores.

Por otro lado y la preparación de modelos y digitalización de geometrías para la modelización hidráulica hay que poner de manifiesto que si HEC-GeoRAS facilita considerablemente la definición de geometrías sería deseable algunos avances. Por ejemplo, HEC-GeoRAS necesita de un MDE en formato ráster o TIN como base altimétrica, no considerando las últimas opciones que da ArcGIS como es el Terrain. La utilidad del Terrain está en la facilidad de generación de modelos a partir de nubes de millones de puntos, como son las generadas por el LIDAR.

En cuanto a la caracterización geométrica de las obras de fábrica y el aporte que supone el uso de la técnica fotogramétrica realizamos el siguiente análisis en función de las siguientes variables:

- Precisión de los modelos obtenidos.
- Completitud de los modelos obtenidos (Capacidad de obtener el modelo completo)
- Dificultad de introducción de modelos en HEC-RAS
- Rentabilidad (menor coste). Considerando el equipo necesario, incluyendo instrumental, software.
- Rapidez de toma de datos en campo.
- Facilidad de acceso a personal cualificado (Tiempo de entrenamiento que requiere el personal que realiza la tarea).
- Rentabilidad del tiempo en gabinete.

- Probabilidad de éxito (Probabilidad de finalizar la modelización de la obra)
- Extracción de datos a posteriori. (Extracción de nuevos datos sin necesidad de volver a campo)

Para realizar esta valoración vamos a plantear tres posibilidades en función de los medios que se pretendan asignar a este cometido.

Posibilidad 1: *Levantamiento topográfico*. Un equipo de topografía realizaría un levantamiento taquimétrico de la obra de fábrica. Se incluirían tomas fotográficas y croquis.

Posibilidad 2: *Toma de medidas*: Un equipo o una persona realizaría una serie de medidas necesarias para definir la obra de fábrica. Se realizarían tomas fotográficas y croquis de la obra.

Posibilidad 3: *Toma de medidas y apoyo en técnicas fotogramétricas*. Un equipo o una persona realizarían una serie de medidas y un reportaje fotográfico desde varios puntos de vista. Se realiza croquis de la obra.

A continuación procedemos a comparar para cada uno de los puntos anteriores los diferentes métodos. La comparación se realiza dando valores del 1 al 5, de forma que la referencia está en el 3 y es el valor medio para el método de adquisición fotogramétrico. Compararemos cada uno de los ítems anteriores estableciendo los siguientes grados de comparación. Mucho Mayor (5), Mayor (4), Igual (3), Menor (2) y Mucho Menor (1).

La comparación es subjetiva y abierta a todo tipo de discusión.

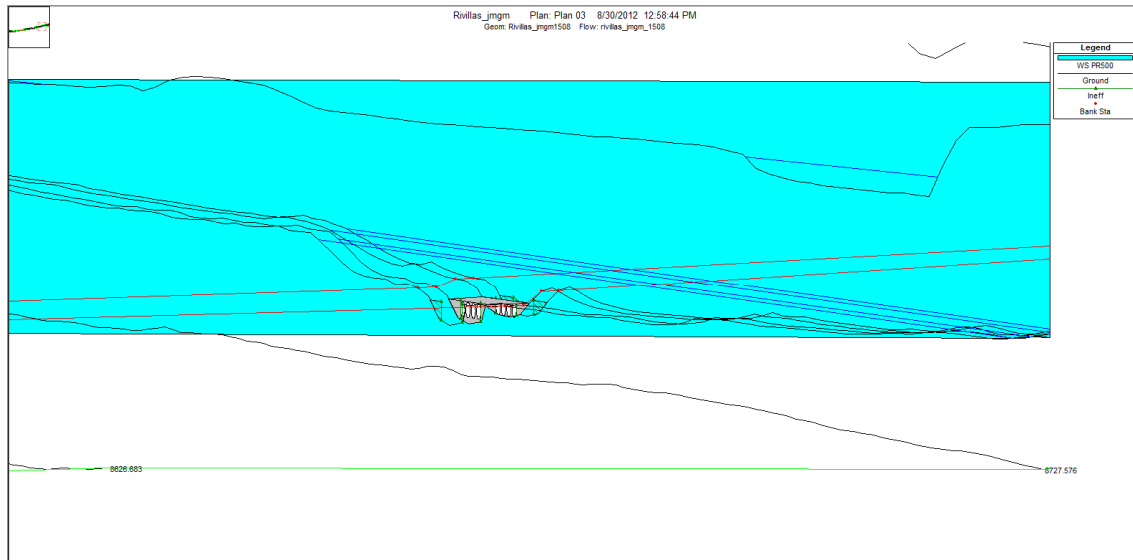
	Lev. Topográfico	Medidas	Fotogrametría
Precisión de los modelos obtenidos.	Mayor	Igual	Referencia
Compleitud de los modelos obtenidos.	Mucho Mayor	Menor	Referencia
Dificultad Introducción de modelos en HEC-RAS	Igual	Igual	Referencia
Rentabilidad (menor coste)	Mucho Menor	Mayor	Referencia
Rapidez de toma de datos en campo.	Mucho Menor	Menor o Igual	Referencia
Facilidad de acceso a personal cualificado.	Mucho Menor	Mayor o igual	Referencia
Rentabilidad por tiempo en gabinete.	Menor	Mayor	Referencia
Probabilidad de éxito.	Mayor	Menor	Referencia
Extracción de datos a posteriori	Menor	Menor	Referencia

Resumiendo las puntuaciones:

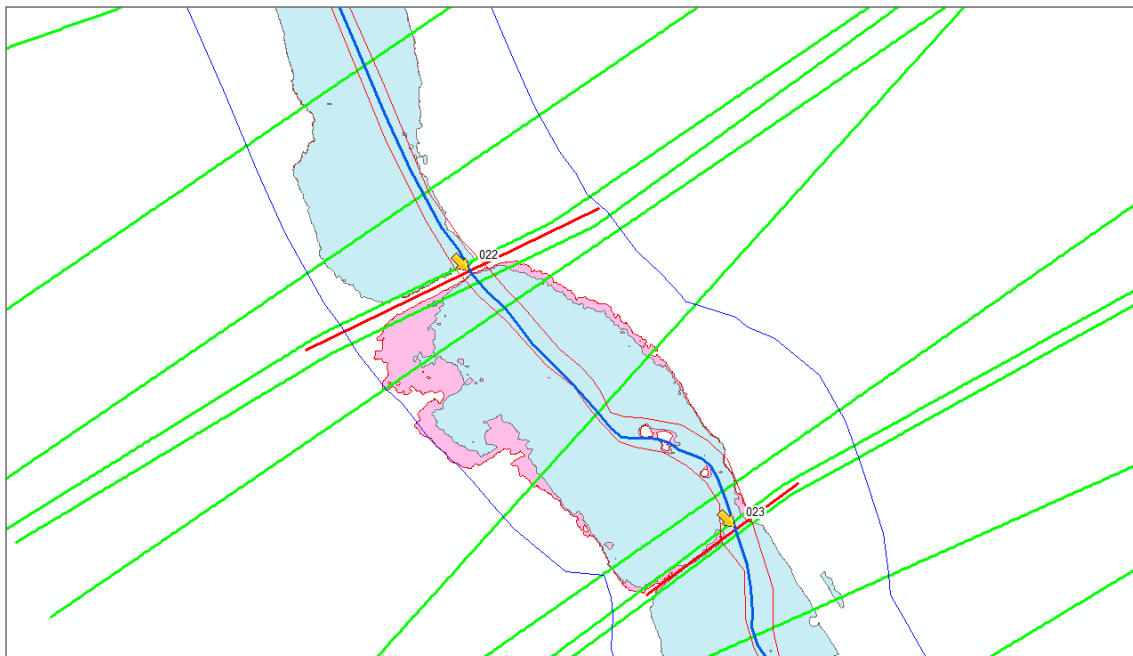
	Lev. Topográfico	Medidas	Fotogrametría
Precisión de los modelos obtenidos.	4	3	3
Compleitud de los modelos obtenidos.	5	2	3
Dificultad Introducción de modelos en HEC-RAS	3	3	3
Rentabilidad (menor coste)	1	4	3
Rapidez de toma de datos en campo.	1	2	3
Facilidad de acceso a personal cualificado.	1	3	3
Rentabilidad por tiempo en gabinete.	2	4	3
Probabilidad de éxito.	4	2	3
Extracción de datos a posteriori	2	2	3
TOTAL PUNTOS:	23	25	27

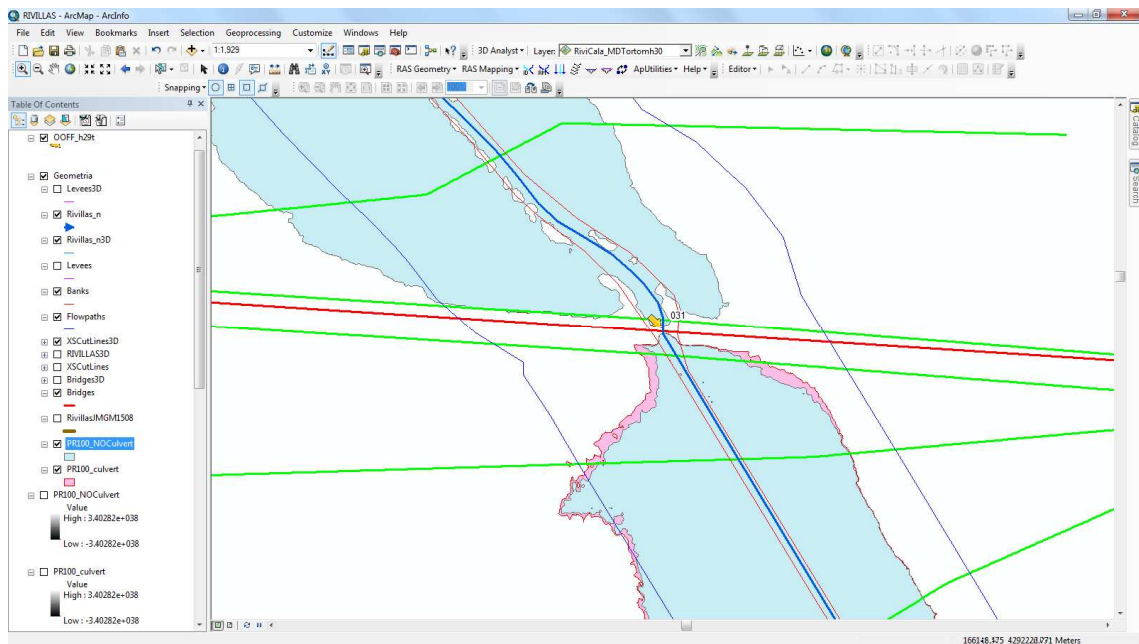
Luego, en esta valoración, totalmente subjetiva y discutible, en la que se castiga mucho el aspecto económico y el tiempo de toma de datos, es la técnica de adquisición en la que interviene la fotogrametría, la más beneficiosa ganando.

Obtenidas las obras de fábrica hemos procedido a su entrada en HEC-RAS. Para demostrar la importancia de introducir estas para el cálculo de las láminas de inundación.



Como fin último del presente trabajo pueden compararse las láminas de inundación obtenidas a partir de la modelización con obras de fábrica y sin estas, habiendo aplicado una metodología que nos permite su reconstrucción geométrica de forma poco costosa. (En rosa modelo con obras de fábrica para periodo de retorno de 100 años. En azul modelo para mismo periodo de retorno y sin obras de fábrica)





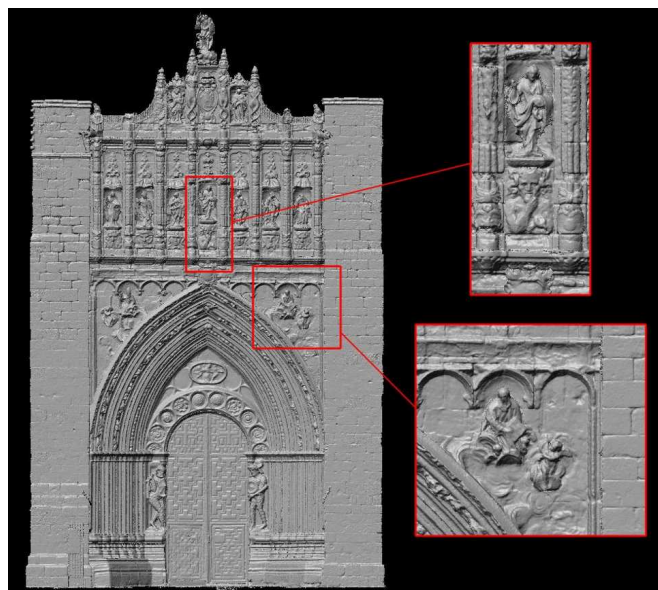
Para realizar esta operación es necesario cada uno de los resultados parciales y finales del presente trabajo.

CONCLUSIONES

A lo largo de la presente memoria se han ido poniendo de manifiesto diferentes conclusiones, en especial cuando se han analizado diferentes alternativas. Concluiremos con una serie de conclusiones más generales sobre la aplicabilidad de los métodos y tecnologías utilizados.

El proceso de reconstrucción de objetos y escenas tridimensionales han sido objeto de gran avance en los últimos años. Han sido y cada es mayor la aplicación de diferentes técnicas en trabajos de documentación patrimonial, reconstrucción de accidentes o todo tipo de escenas, aplicaciones de realidad aumentada, estudio de patologías estructurales, etc. Entre estas técnicas ha destacado la tecnología basada en la medición directa mediante dispositivos LASER materializados en sistemas de escaneado tridimensional de uso terrestre y LIDAR. Esta técnica todavía no ha tocado techo, pues en los últimos dos años estamos asistiendo a una disminución de coste importante en este instrumental, si bien, su desarrollo se ha visto frenado por la disminución en la demanda de trabajos de documentación patrimonial.

Ahora bien, en fotogrametría se han ido desarrollado nuevas soluciones de software que permiten cada vez más obtener de forma rápida, económica y sencilla modelos tridimensionales precisos a partir de una buena geometría de toma. Un claro ejemplo es la aplicación PhotoScan que permite la reconstrucción de escenas 3D a partir de varias tomas por estereocorrelación de las imágenes. En el



mismo sentido están avanzando instituciones académicas, desarrollando soluciones propias como la del Grupo de Investigación Reconocido TIDOP del Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno de la Universidad de Salamanca o la del Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica de la Universidad de Valladolid, de la que mostramos la imagen con un GSD de 1 mm.

En definitiva, se trata de técnicas que avanzan y que cada vez son más competitivas y más aplicables y en el caso de la fotogrametría realmente asequible. Cabría hacerse la siguiente pregunta, ¿Por qué si de un trabajo de campo me puedo traer con mi cámara una escena 3D métrica, debemos conformarnos con una imagen con información cualitativa? También en el caso de una sola imagen se producen novedades que permitan la extracción de mediciones de la imagen, pero entendemos que son técnicas complementarias.

Luego, en este trabajo se ha desarrollado una metodología que basándonos en técnicas fotogramétricas permite un mejor conocimiento y documentación del medio, en este caso las obras de fábrica, cuya inclusión en los modelos hidráulicos resulta imprescindible si se quieren obtener buenos resultados.

No obstante, y para poder comprender mejor las necesidades de la modelización hidráulica se ha realizado una modelización completa de una zona piloto. Una zona donde confluyen actuaciones agrarias y urbanísticas totalmente desordenadas que han provocado la alteración de los regímenes naturales de las corrientes, llevando a cabo el encauzamiento a través de zanjas fuera de la zona del cauce natural en zonas donde los cauces atraviesan urbanizaciones con población permanente.

El LIDAR aporta nuevas posibilidades y mayor precisión en la observación de los fenómenos que se dan en el territorio, en especial aquellos ligados a las acciones del hombre como es la construcción, la agricultura y la modificación del entorno natural. La precisión alcanzada en la medición de dispositivos LIDAR auxiliado por medios de navegación en plataformas aéreas permite la observación de cambios en el territorio, además de disponer modelos más densos y precisos que los obtenidos hasta ahora.

Ahora bien, en las grandes virtudes de esta técnica radica también su principal defecto. Cualquier análisis realizado a partir de datos LIDAR debe ser hecho con plena conciencia del tratamiento que ha tenido la nube de puntos desde su captura hasta el origen del análisis. Es fundamental que la información que proporcione el LIDAR esté convenientemente referenciada a los datums locales, tanto planimétricos como altimétricos.

Para la aplicación en modelización hidráulica es imprescindible realizar una buena clasificación de los puntos de forma que se pueda obtener un MDE lo más fiel posible.

Por último, en el caso del presente trabajo, la modelización hidráulica es un medio a la vez que un fin. Se trata de un fin, pues en modelización queda plasmado el resultado de todo el trabajo anterior. Sin embargo la modelización hidráulica no sólo depende de las condiciones geométricas del entorno, faceta donde el profesional en geomática puede aportar sus conocimientos, si no que depende de la experiencia y las consideraciones del experto en hidráulica e hidrología.

Para poder llegar a conclusiones válidas el experto en geomática debe conocer el proceso completo en la modelización.

En el caso del presente trabajo se ha utilizado el software de modelización hidráulica HEC-RAS no pudiendo llegar a conclusiones sobre los cálculos, pues están fuera de mi alcance. Sin embargo, es posible dilucidar soluciones que permitan una mejor extracción de la información geométrica a partir del LIDAR u otros modelos y que podrían ser implementadas en el futuro.

LÍNEAS ABIERTAS / DESARROLLOS FUTUROS

Uso de Estándares

La primera reflexión a realizar es la cantidad de paquetes de software, diferentes tecnologías y fuentes de datos que hay que emplear y dominar para realizar el presente estudio.

Otra posible reflexión es la dificultad que tendría utilizar los productos desarrollados en otros paquetes de software posibles.

Es realmente difícil, al menos por el momento, pensar en modelos que puedan contener cualquier característica de la superficie terrestre y cuyos datos puedan ser servidos a cualquier aplicación para su explotación.

Por otro lado, las diferentes disciplinas tendrán sus paquetes de software independientes que permitirán realizar análisis y a partir de métodos de cálculo, obtener las conclusiones requeridas.

Esta circunstancia que se pone claramente de manifiesto en este trabajo se repite casi la totalidad de estudios multidisciplinares que utilicen las TIC (Tecnologías de la Información y las Comunicaciones).

Cada vez son más los productos disponibles, pero sigue siendo difícil su reutilización. La solución a estos problemas está en la interoperabilidad a partir de la utilización de estándares.

La situación ideal en el presente trabajo hubiera sido la siguiente:

- Modelización de las obras de fábrica en un estándar 3D.
- Modelos Digitales de Elevación en formatos universales y estándares.
- Posibilidad de utilizar diferentes modelos hidráulicos capaces de tomar la información de los estándares.

Sólo a partir del desarrollo y uso común de los estándares podremos llegar a la reutilización de diferentes productos.

Ahora bien, un aspecto tan importante como la interoperabilidad es la trazabilidad y certificación de la información. Es imprescindible el control de estos aspectos formales en un mundo en el que el acceso a la información es cada vez más fácil.

Un ejemplo a seguir son los estándares auspiciados por la OGC (Open Geospatial Consortium)

Mejor aprovechamiento de los datos LIDAR

Un aspecto mejorable dentro del módulo HEC-GeoRAS sobre ArcGIS y si se tienen los datos LIDAR es la forma en la que se puede extraer los perfiles del terreno. La propia naturaleza de los datos LIDAR hace que puedan confundirse con facilidad puntos de vegetación con puntos de suelo desnudo, falseando los datos del perfil al tomarlos del modelo.

Cuando un algoritmo realiza una clasificación de suelo desnudo para puntos LIDAR lo hace teniendo en cuenta los puntos vecinos, pero no teniendo en cuenta una dirección predominante, como sucede cuando se realiza un perfil.

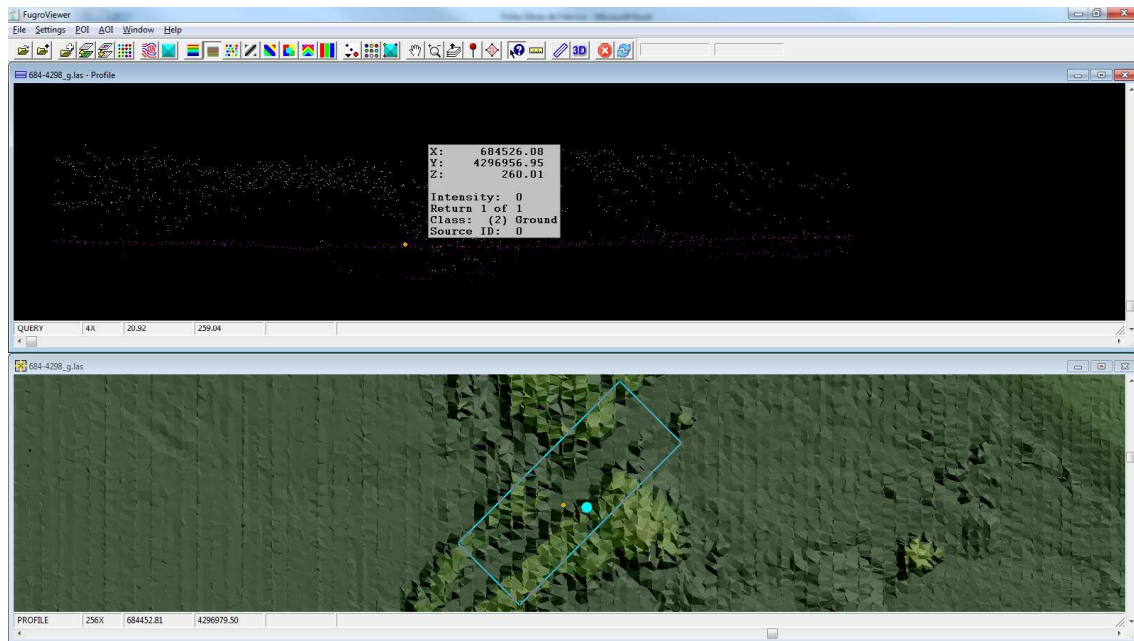
En la siguiente imagen en la que se ha realizado



un perfil con ancho de varios metros a ambos lados de una estructura se puede observar como los puntos LIDAR definen la sección en la zona de la obra con bastante claridad

Sin embargo pueden también observarse puntos de color magenta (clasificados como suelo) dentro de la sección externa que definen los puntos. Estos puntos serán incorporados al MDE disminuyendo la superficie de la sección y dando lugar a errores en el cálculo.

También es cierto que una clasificación escrupulosa llevada a cabo en el sentido transversal del cauce podría solucionar este problema, pero siempre contando con un operador manual en lugar de un algoritmo.



LIDAR Batimétrico

Otro factor importante para poder llegar a utilizar el LIDAR para la generación de modelos digitales válidos para la modelización hidráulica, es poder disponer de datos batimétricos. Algunas experiencias ya han sido realizadas con éxito parcial utilizando haces LASER dentro del espectro visible, pero sería necesario disponer de esta información, siendo una de las líneas de desarrollo futuro.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- **Análisis aplicado de métodos de calibración de cámaras para usos fotogramétricos.** Sánchez Martín, N.; Arias Pérez, B.; González Aguilera, D.; Gómez Lahoz, J. Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno. Universidad de Salamanca.
- **HEC-RAS. River Analysis System. User's Manual. Version 4.1.** Junio 2010
US Army Corps of Engineers. Hydologic Engineering Center.
- **HEC-RAS. River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 4.1.** Junio 2010
US Army Corps of Engineers. Hydologic Engineering Center.
- **HEC-RAS. River Analysis System. Application Guide.. Version 4.1.** Junio 2010
US Army Corps of Engineers. Hydologic Engineering Center.
- **Manual Básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-GeoRAS 3.1.1..** Febrero 2007
Leonardo S. Nanía, Emilio Molero. Área de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Granada.
- **Hydraulic Design of Highway Culverts.** Septiembre de 1985.
US Department of Transportation. Federal Highway Administration. FHWA
- **Hydraulic Design of Highway Culverts.** Septiembre de 2001.
US Department of Transportation. Federal Highway Administration. FHWA
- **Manual introductorio a HEC-RAS.** Julio 2007
F. Javier Sánchez San Román. Dpto. Geología. Universidad de Salamanca.
- **Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables** Noviembre 2011
CEDEX, IGME, INDUROT, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
- **Curso práctico de drenaje de carreteras.** Marzo 2004
Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Madrid
- **Análisis dimensional a partir de una sola imagen.** 2011
. Universidad de Salamanca
- **Procesamiento de datos LIDAR con ArcGIS Desktop 10.** 2011
Antonio San José Albacete. Trabajo final mastern en Geotecnologías de la información geográfica
- **Agisoft PhotoScan User Manual. Professional Edition, Version 0.8.4.** 2011
- **Nota de Servicio sobre la realización de inspecciones de nivel básico en obras de fábrica (muros y obras de contención, obras de paso y túneles) de la red de carreteras del estado.** 2007. Ministerio de Fomento
- **La fotogrametría digital. Su aplicación en levantamiento de planos de edificios.**
Máster en rehabilitación de edificios. Universidad Politécnica de Madrid

- **Advanced LIDAR data processing with LASTOOLS.**
C.Hug, P. P. Krzystek , W. Fuchsc. Paper presented at the XXth ISPRS Congress, 12-23. July 2004, Istanbul, Turkey
- **Influencia antrópica en la avenida de 1997 en el río Rivillas. (Badajoz). Cambios de usos e impacto geomórfico.** 2008
J.A. Ortega Becerril, M.G. Garzón Heydt. Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid

REFERENCIAS WEB

- Sv3dvision: <http://www.fayerwayer.com/2011/02/desarrollan-software-para-recrear-3d-a-partir-de-una-sola-fotografia/>
- Sv3dvision: <http://www.usal.es/webusal/node/6747>
- Agisoft PhotoScan: <http://www.agisoft.ru/>
- Agisoft Lens <http://www.agisoft.ru/products/lens/>
- ArcGIS: Generación MDT a partir de datos LIDAR:
<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//00q80000006m000000>
- ArcGIS: Dataset Terreno:
<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//005v00000002000000>
- LasTools: <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/>
- Clasificación datos LIDAR:
http://www.opentopography.org/index.php/blog/detail/tools_for_lidar_point_cloud_filtering_classification
- Clasificación datos LIDAR: <http://sourceforge.net/apps/trac/mcclidar/>
- LIDAR: <http://lidar.com.es/>
- <http://meteo-badajoz.blogspot.com.es/2011/11/14-aniversario-de-la-riada-de-badajoz.html>
Javier Piñero F. Autor del blog de observación meteorológica:
<http://meteo-badajoz.blogspot.com.es>

ANEXO. LOCALIZACIÓN E INVENTARIO DE LAS OBRAS DE FÁBRICA